



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

AUGUSTO CÉSAR ALBUQUERQUE DE ALMEIDA

Trabalho de Conclusão de Curso

Chaveamento Controlado de Linhas de Transmissão por Meio de Disjuntores Equipados com Manobra Tripolar

CAMPINA GRANDE - PB DEZEMBRO DE 2019

AUGUSTO CÉSAR ALBUQUERQUE DE ALMEIDA

Chaveamento Controlado de Linhas de Transmissão por Meio de Disjuntores Equipados com Manobra Tripolar

*Trabalho de Conclusão de Curso
submetido à Coordenação do curso de
graduação em Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Campina Grande
como parte dos requisitos necessários para
a obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência

Karcus Marcelus Colaço Dantas, D.Sc.

Professor Orientador

Campina Grande, Paraíba
Dezembro de 2019

Dedico este trabalho à Deus, minha família, amigos, e a todos que contribuíram de forma direta e indireta para essa conquista.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me proporcionado várias oportunidades e pelo discernimento em tomar as melhores decisões, por estar sempre ao meu lado me guiando.

Aos meus pais Arlindo e Auxiliadora pela educação que me deram e apoio incondicional em todas as situações e pelo amor e carinho dedicado.

A todos os meus amigos que me ajudaram ao longo do curso, seja com palavras de apoio ou com ensinamentos. Em especial a Romulo, Caio Victor, Rodrigo Kalil, Antônio, Arthur, Iago, Breno, José Lucas e entre outros.

Ao professor Karcius Marcelus pela disponibilidade e incentivo a realização deste trabalho, apesar de não ter sido possível a realização de uma pesquisa científica podemos dar continuidade como trabalho de conclusão de curso.

A minha namorada Marcela por está sempre ao meu lado me ajudando, incentivando e entendendo todos os momentos de dificuldade.

Ao Laboratório de Alta Tensão – LAT por disponibilizar suas instalações para que pudesse realizar as simulações.

Aos professores do curso de Engenharia Elétrica por terem deixado um pouco deles em mim, não só na formação acadêmica, como também na minha formação como ser humano.

Aos funcionários da UFCG, em especial ao Departamento de Engenharia Elétrica pela presteza e carinho dedicados aos alunos.

Finalmente, a todos que direta ou indiretamente participam da minha vida. Vocês estão nas páginas, letras, cores, do meu lado, estão em mim.

*Sem sonhos a vida não tem brilho.
Sem metas os sonhos não têm alicerces.
Sem prioridades, os sonhos não se tornam reais.
Sonhe, trace metas, estabeleça prioridades e corra
riscos para executar seus sonhos.
Melhor é errar por tentar do que errar por se omitir!*

Augusto Cury.

RESUMO

Este trabalho aborda o estudo de chaveamento controlado em linhas de transmissão por meio de disjuntores equipados com manobra tripolar, aplicado a manobras de energização e religamento de linhas. Será modelado um sistema elétrico com duas barras no ATP (*Alternative Transients Program*), para que seja possível observar o transitório ao longo da linha devido ao chaveamento. Um algoritmo é aplicado no sistema para que escolha o melhor instante em que deve ocorrer a abertura ou fechamento do disjuntor, que consiste basicamente em determinar o instante em que as tensões entre os contatos do disjuntor é zero e compara os valores de sobretensão quando tem o chaveamento unipolar em que os instantes ideais para cada fase são distintos e o chaveamento tripolar quando o disjuntor fecha os seus contatos simultaneamente. Serão analisadas as seguintes condições de operação: energização, religamento das fases de forma simultânea e de maneira independente sem compensação em derivação, com derivação de 30% e 80%, considerando os efeitos da carga residual.

Palavras-Chave: Disjuntores, Sobretensão, Técnicas de chaveamento, Transitórios eletromagnéticos.

ABSTRACT

The present work is about a study of controlled switching in transmission lines through three-pole switched circuit breakers applied in energization switching and lines reclosing. It will be modeled a electrical system with two bars at ATP (Alternative Transients Program), to observe the transient among the line due the switching. An algorithm is applied in the system to choose the best moment to open or close the circuit breaker. This consists, basically, to determinate the instant in when the voltages between the circuit breaker contact is zero and compare the values of overvoltage when happens a unipolar switching that the instants in each phases as distinctic and the tripolar switching when the circuit breaker closes all the contacts simultaneously. It will be analyzed the following conditions of operation: energization, simultaneous reclosing of phases and independently without shunt compensation, with 30% and 80% shunt, considering the effects of trapped charge.

Keywords: Circuit Breakers, Overvoltage, Switching Techniques, Electromagnetic Transients.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Representação dos diferentes tipos de sobretensão.....	17
Figura 2 Resistor de pré-inserção usado no amortecimento de sobretensões de manobra .	19
Figura 3 Resistor de Pré-inserção	20
Figura 4 Para-raios 500Kv	22
Figura 5 Tempos em um chaveamento controlado.....	23
Figura 6 Forma de onda de tensão em uma manobra de energização	24
Figura 7 Forma de onda de tensão em um religamento de LT	25
Figura 8 Linha com compensação em derivação.....	26
Figura 9 Forma de onda de tensão no disjuntor devido ao acoplamento magnético	27
Figura 10 Tensão nos contatos do disjuntor (DANTAS, 2007)	30
Figura 11 Forma de onda da tensão no disjuntor.....	30
Figura 12 Tensão nos contatos do disjuntor em linha sem compensação reativa.....	31
Figura 13 Tensão residual na linha de transmissão	32
Figura 14 Tensão nos contatos do disjuntor	33
Figura 15 Tensão de referência para chaveamento em LTs com compensação de 80% ...	34
Figura 16 Tensão de referência para chaveamento em LTs com compensação de 30% ...	34
Figura 17 Tensão nos terminais do disjuntor.....	35
Figura 18 Esquema do sistema elétrico modelado no ATP.....	36
Figura 19 Energização sem chaveamento controlado.....	38
Figura 20 Energização com chaveamento independente.....	38
Figura 21 Energização com chaveamento simultâneo.....	39
Figura 22 Religamento sem chaveamento controlado.....	40
Figura 23 Religamento com chaveamento independente	40
Figura 24 Religamento com chaveamento simultâneo	41
Figura 25 Religamento com compensação de 80% e sem chaveamento controlado.....	42
Figura 26 Religamento com Compensação 80% e chaveamento controlado independente	42
Figura 27 Religamento com Compensação 80% e chaveamento controlado simultâneo ..	43
Figura 28 Religamento com Compensação 30% sem chaveamento controlado	43
Figura 29 Religamento com Compensação 30% e com chaveamento independente.....	44
Figura 30 Religamento com Compensação 30% e chaveamento simultâneo	44
Figura 31 Valores de tensão ao longo da linha em manobra de energização	45
Figura 32 Valores de tensão ao longo da linha em manobra de religamento sem compensação.....	45

Figura 33 Valores de tensão ao longo da linha em manobra de religamento com compensação de 80%.....	46
Figura 34 Valores de tensão ao longo da linha em manobra de religamento com compensação de 30%.....	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Classes e formas de solicitação de tensão.....	17
Tabela 2 Módulo e fase das fontes de tensão ($V_{base}=550kV$).....	36
Tabela 3 Impedância das fontes.....	37
Tabela 4 Dados de sequência da linha de transmissão	37
Tabela 5 Dados dos reatores	37

Sumário

1. Introdução	13
1.1 Objetivos do trabalho	15
1.2 Estrutura do trabalho	15
2. Fundamentação Teórica	16
2.1 Sobretensões	16
2.2 Métodos de redução de sobretensão de manobra	19
2.2.1 Resistor de pré-inserção	19
2.2.2 Para-raios	21
2.3 Chaveamento Controlado	22
2.3.1 Energização de Linhas de Transmissão	24
2.3.2 Religamento de Linhas de Transmissão	25
2.4 Acoplamento Eletromagnético	26
3. Implementação do Método	28
3.1 Análise da carga residual	28
3.2 Estratégia para manobra de energização	29
3.4 Estratégia para manobra de religamento	31
4. Avaliação do método	36
4.1 Energização da Linha de Transmissão	37
4.2 Religamento de Linhas de Transmissão sem Compensação	39
4.3 Religamento de Linhas de Transmissão com Compensação	41
5. Conclusão	47
Referências	49

1. INTRODUÇÃO

O chaveamento em linhas de transmissão, banco de capacitores e reatores geralmente causam transitórios eletromagnéticos no sistema elétrico de potência. Sendo os transitórios responsáveis por gerar sobretensões no sistema, harmônicos e em alguns casos atuação de para-raios e acionamento indevido da proteção. Dentre essas consequências, a sobretensão é o principal problema causado pelos transitórios e apesar da impossibilidade de eliminar esse fenômeno, é possível reduzir suas amplitudes para não comprometer o funcionamento dos equipamentos do sistema.

As sobretensões ocasionadas pela manobra em linhas de transmissão são importantes para a coordenação de isolamento de equipamentos e na proteção do sistema. Diante disso, faz-se necessário desenvolver novas técnicas cada vez mais eficientes, com o propósito de reduzir as amplitudes nos sistemas de potência causada pelo chaveamento de disjuntores. Um estudo mais preciso de como o sistema reage a sobretensões se faz necessário para melhorar a proteção do sistema e dimensionamento dos equipamentos elétricos. Por possuírem caráter estocástico as sobretensões variam suas amplitudes podendo chegar a 4 pu (ARAÚJO; NEVES, 2005).

O dimensionamento do sistema deve contemplar além do nível de tensão em regime permanente, as sobretensões sustentadas e os transitórios ocasionados pelos chaveamentos em disjuntores. Portanto, com o intuito de reduzir as sobretensões e permitir que o sistema seja o mais compacto e estável possível, reduzindo os custos, existem diversos métodos de atenuar as amplitudes. Os métodos consistem na utilização de RPI (Resistor de Pré-Inserção) nos terminais de disjuntores, em que o resistor é responsável por proporcionar uma queda de tensão devido a lei de Ohm. Na maioria das vezes, esse método está associado a utilização de para-raios nos terminais da linha, mas devido ao alto custo de implementação e manutenção o RPI vem sendo menos utilizado no sistema.

O método de chaveamento controlado reduz significativamente as amplitudes de sobretensão, propondo controlar o instante de abertura e fechamento dos contatos dos disjuntores, por meio de um dispositivo de controle responsável pelo comando. O instante de acionamento é importante pois os surtos originados no disjuntor devido as manobras realizadas são dependentes das tensões entre os contatos do disjuntor, sendo o melhor instante para a manobra do disjuntor quando a tensão em que o equipamento está submetido se encontra próxima do zero.

Os dispositivos de controle utilizados em disjuntores usam valores de tensão e corrente como referência para escolher os instantes ótimos de abertura e fechamento do disjuntor. Os tempos de operação e comando são levados em consideração para determinar o melhor instante. Apesar da utilização de um sistema de controle eletrônico o método se mostra bastante vantajoso em relação a custos e fácil implementação no sistema elétrico.

A eficiência do método sofre influência bastante significativa do nível de tensão por provocar um maior acoplamento magnético entre as fases. Outro fator que deve ser levado em consideração é a forma de atuação do disjuntor, sendo o comando de acionamento de forma independente ou simultânea.

Diante disso, as simulações de transitórios eletromagnéticos são fundamentais para o planejamento e operação de equipamentos. No caso de estudos de planejamento, a avaliação de fenômenos transitórios é determinante para o dimensionamento adequado dos equipamentos que são sujeitos a surtos de tensão de diversas origens. Em relação a operação dos equipamentos, a análise de transitórios eletromagnéticos é importante tanto para a análise de problemas no sistema quanto para a definição de medidas de operação através dos estudos pré-operacionais. Portanto, essas análises são fundamentais no momento de parametrização de dispositivos.

Neste trabalho será abordado especificamente sobretensões transitórias ocasionadas por manobras de energização e religamento de linhas de transmissão com e sem compensação reativa, em que caso medidas preventivas não sejam adotadas, a tensão no terminal em vazio pode alcançar valores acima de 3,0 pu., embora geralmente tais valores sejam menores (D'AJUZ et al., 1987).

A energização e religamento trifásico de linhas de transmissão são manobras frequentes, cuja amplitude dos transitórios é influenciada pela configuração do sistema, bem como pelas características dos equipamentos. Geralmente as sobretensões transitórias advindas destas manobras são limitadas por métodos convencionais. Com isso, os métodos convencionais para redução de sobretensão consistem na aplicação de resistores de pré-inserção nos disjuntores, muitas vezes associados a para-raios de óxido metálico em ambos os terminais da linha e o método de chaveamento controlado. O uso de resistores de pré inserção, apesar de ser um método efetivo, apresenta uma aceitação de sua tecnologia tendente a diminuir devido ao alto custo de implementação e manutenção, como será mostrado posteriormente.

1.1 Objetivos do trabalho

O objetivo geral do trabalho é estimar valores de sobretensões gerados pelo chaveamento em uma linha de transmissão durante as manobras de energização e religamento, em disjuntor com manobra tripolar.

Os objetivos específicos são:

- Estudar os métodos de redução de sobretensão;
- Desenvolver uma rotina computacional para cálculo do instante ótimo;
- Realizar simulações de um sistema no ATP;
- Gerar e analisar dados provenientes do ATP.

1.2 Estrutura do trabalho

Este trabalho será organizado em 6 capítulos. O primeiro capítulo mostra uma breve introdução ao tema. No capítulo 2 apresenta-se a fundamentação teórica sobre as técnicas de chaveamento controlado e conceitos de sobretensões. No capítulo 3, são apresentadas as técnicas de implementação dos métodos utilizados para redução das sobretensões. Em seguida, serão apresentados os resultados obtidos com a implementação dos métodos ao longo do capítulo 4. Diante de todas as análises realizadas ao longo do trabalho, existe a possibilidade de realizar outros estudos no sistema elétrico simulado e por fim, no capítulo 5 é apresentada as conclusões acerca de chaveamento controlado aplicado em redução de sobretensões e a comparação dos resultados obtidos pelos dois tipos de manobras.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O chaveamento controlado de linhas de transmissão é uma das soluções para minimizar os efeitos negativos causados pelos surtos de manobras, como a redução da qualidade de energia e a redução da vida útil dos equipamentos. No sistema elétrico de Extra Alta Tensão e Ultra Alta Tensão as sobretensões de manobra são as principais causas de ruptura de isolamento, isso ocorre devido a mudança da característica do sistema, causadas por energização de linhas ou religamentos. Para esses níveis de tensão os danos causados pelos surtos de manobras são mais prejudiciais comparados a surtos atmosféricos, por acarretar em maiores solicitações ao sistema.

Diante do surgimento de surtos de manobras é possível associar o nível de sobretensão ao instante em que ocorre a abertura e fechamento do disjuntor. No caso particular de energização ou religamento de linhas de transmissão, os sinais de referência são as tensões entre os contatos de cada polo do disjuntor e os instantes ótimos ocorrem nas passagens por zero destes sinais (DANTAS, 2012). No caso de disjuntores equipados para manobra monopolar é possível identificar o instante de passagem por zero e realizar a manobra de cada fase separadamente, mas nos casos em que a manobra é tripolar é necessário escolher um instante ótimo para que possa reduzir o nível de sobretensão.

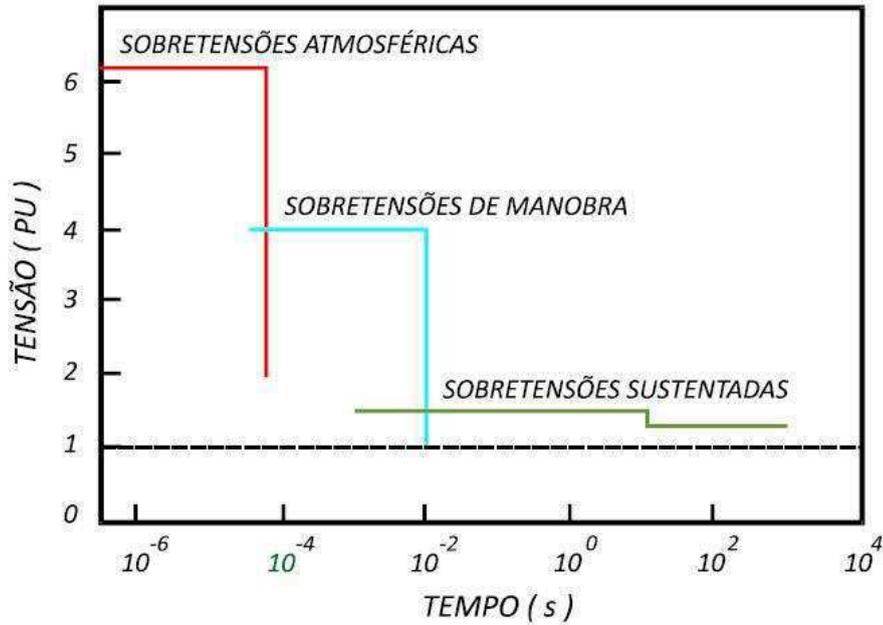
A seguir, serão desenvolvidos conceitos importantes para um melhor entendimento das técnicas de chaveamento controlado de linhas de transmissão. O estudo realizado será baseado em energização e religamento de linhas de transmissão com diferentes níveis de compensação em derivação.

2.1 Sobretensões

Sobretensão é a definição de toda tensão que excede 110% do valor da tensão nominal em um sistema elétrico (CHAGAS, 2015). Esse distúrbio no sistema pode causar severas solicitações nos isolamentos a depender do nível de tensão, podendo prejudicar equipamentos e interromper de forma inadequada o fornecimento de energia elétrica. Quanto maior o nível de tensão, maior deverá ser o cuidado com a escolha dos equipamentos nas subestações, procurando avaliar as diversas formas de solicitações a que os isolamentos estarão submetidos, com o intuito de evitar danos aos equipamentos. Existem alguns tipos de sobretensões, que se

diferenciam pela duração e seu nível, na figura a seguir podemos ver que a sobretensão de manobra, assunto que será bastante abordado no trabalho pode ter amplitude de até 4pu.

Figura 1. Representação dos diferentes tipos de sobretensão.



Fonte : CHAGAS(2015).

Os tipos de solicitações de tensão são fatores importantes para dimensionar os equipamentos de forma correta. Na tabela 1 são apresentados detalhes sobre as classes e formas das solicitações de tensão, definidas pela norma ABNT - NBR 6939 (2000)- Coordenação do Isolamento – Procedimento.

Tabela 1. Classes e formas de solicitação de tensão.

Classe	Baixa frequência		Transitório		
	Contínua	Temporária	Frente lenta	Frente rápida	Frente muito rápida
Forma da tensão					
Faixas de formas de tensão	$f = 50 \text{ Hz ou } 60 \text{ Hz}$ $T_t \geq 3600 \text{ s}$	$10 \text{ Hz} < f < 500 \text{ Hz}$ $3600 \text{ s} \geq T_t \geq 0,03 \text{ s}$	$5000 \mu\text{s} \geq T_{cr} > 20 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 20 \text{ ms}$	$20 \mu\text{s} \geq T_1 > 0,1 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 300 \mu\text{s}$	$100 \text{ ns} \geq T_r > 3 \text{ ns}$ $0,3 \text{ MHz} < f_1 < 100 \text{ MHz}$ $30 \text{ kHz} < f_2 < 300 \text{ kHz}$ $T_1 \leq 3 \text{ ms}$
Forma normalizada da tensão	$f = 50 \text{ Hz ou } 60 \text{ Hz}$ T_t^*	$48 \text{ Hz} \leq f \leq 62 \text{ Hz}$ $T_t = 60 \text{ s}$	$T_{cr} = 250 \mu\text{s}$ $T_2 = 2500 \mu\text{s}$	$T_1 = 1,2 \mu\text{s}$ $T_2 = 50 \mu\text{s}$	*
Ensaio normalizado de tensão suportável	*	Ensaio de frequência fundamental de curta duração	Ensaio de impulso de manobra	Ensaio de impulso atmosférico	*

Fonte : NBR 6939.

As sobretensões de manobra são causadas por operações de chaveamento que mudam a configuração do sistema, podendo ser uma energização ou religamento de linhas de transmissão, chaveamento de bancos de capacitores e reatores. Essas manobras provocam mudanças nos campos elétricos e magnéticos associados aos elementos indutivos e capacitivos, tendo como consequência surtos de tensão que duram de alguns milissegundos a vários ciclos e valores de pico máximos de 4pu. e com forma de oscilação amortecida com alguns kHz, como pode ser visto na Tabela 1. Os surtos de manobra têm valores determinantes nos níveis de isolamento para sistemas superiores a 400 kV, aumentando consideravelmente sua intensidade para elevados níveis de tensão no sistema elétrico.

As manobras que são realizadas com maior frequência no sistema elétrico são energização e religamentos de linhas de transmissão, são realizados por meio do fechamento dos contatos dos disjuntores, podendo ser monopolar ou tripolar. Essas manobras são realizadas por meio de disjuntores que podem diferir a forma de acionamento, sendo capaz de alterar a eficiência do método de chaveamento controlado, devido a determinação do instante ótimo ser realizado de forma distinta para cada tipo de acionamento. Existem alguns fatores que são determinantes nos valores de amplitude e duração das sobretensões, podemos destacar os seguintes parâmetros (VALERO, 2007):

- Parâmetros do disjuntor:
 - Presença de resistores de pré-inserção;
 - Instante em que é realizada a manobra no disjuntor;
 - Concordância ente os contatos, ou seja, intervalo entre os instantes de fechamento do primeiro e do último polo do disjuntor.

- Parâmetros da linha de transmissão:
 - Comprimento da linha;
 - Grau de compensação em derivação;
 - Presença de cargas residuais na linha;
 - Valores de resistência, indutância e capacitância.

- Parâmetros da fonte:
 - Potência de curto-circuito;
 - Tensão de pré-manobra.

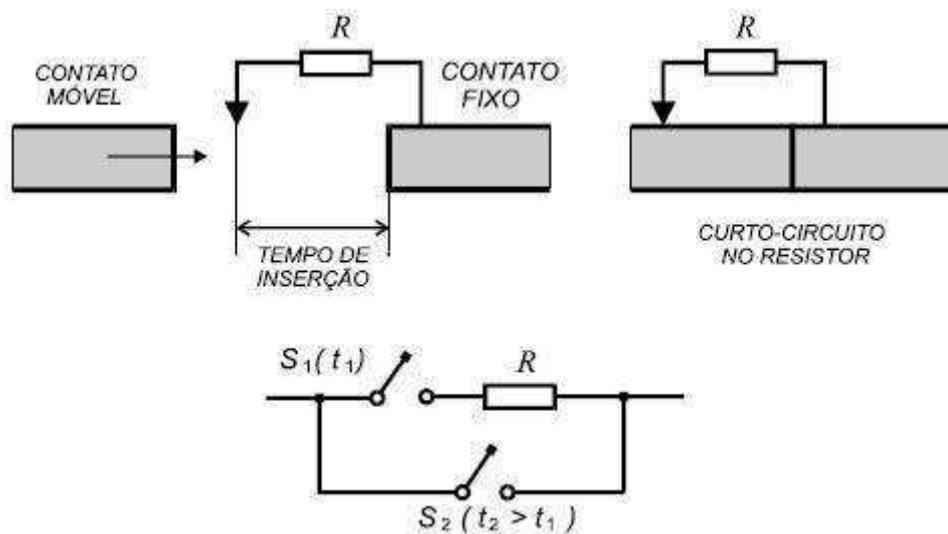
2.2 Métodos de redução de sobretensão de manobra

Atualmente, nas linhas de transmissão a forma mais empregada para limitar os níveis de sobretensão são os para-raios e os resistores de pré-inserção. O chaveamento controlado apesar de ser uma técnica que apresenta ótimos resultados, vem sendo usado de forma gradativa, isso se dá ao fato de que sistemas que já estão instalados não são submetidos a *retrofits*, sendo possível reduzir os níveis de sobretensão e obter valores de picos máximos, próximos ao nominal.

2.2.1 Resistor de pré-inserção

Os resistores utilizados no fechamento de disjuntores, também conhecidos como resistores de pré-inserção (RPI), são um dos métodos mais utilizados para reduzir a amplitude de sobretensões geradas por manobras de chaveamento em linhas de transmissão. São instalados em paralelo com os disjuntores, sendo um resistor para cada polo. Os RPI são componentes que podem apresentar um considerável índice de falhas quando em operação e alto índice de manutenção.

Figura 2. Resistor de pré-inserção usado no amortecimento de sobretensões de manobra.



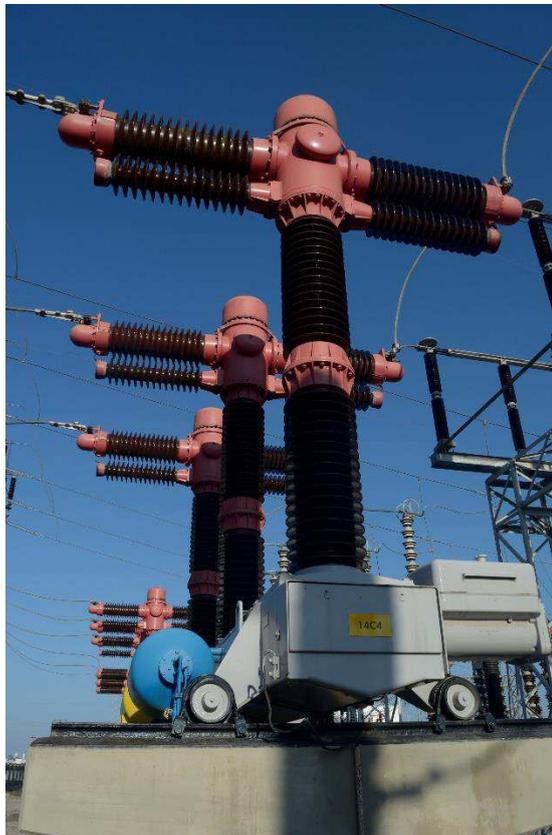
Fonte: Chagas (2015).

Na figura acima pode-se observar que o resistor de pré-inserção é instalado em câmaras auxiliares em paralelo e o chaveamento é composto por duas chaves e um resistor, sendo a manobra nas chaves realizada de forma sequencial, quando o disjuntor recebe o comando de

fechamento dos seus contatos, a chave S_1 é acionada em um tempo t_1 , inserindo o resistor em série entre a fonte e a linha de transmissão. Após um período entre 6 e 10 ms (Chagas 2015) a chave S_2 é acionada no tempo t_2 , realizando um curto-circuito no resistor e colocando a linha de transmissão na tensão nominal do sistema. O valor do resistor não deve possuir uma alta resistência, caso possua para o tempo t_1 existiria uma grande queda de tensão na linha de transmissão, e no instante t_2 , iria ocorrer sobretensão devido ao chaveamento e curto-circuito no resistor. Para evitar que isso ocorra é aconselhável utilizar o resistor com valor igual a impedância característica da linha. Diante disso, é possível observar que esse processo energiza a linha de transmissão em duas etapas, na primeira o resistor é inserido reduzindo o nível de tensão e na segunda o resistor é curto circuitado mantendo a tensão nominal.

Na figura 3 é possível observar como o resistor de pré-inserção se configura com um conjunto de mecanismos e peças que acrescenta ao disjuntor uma ou mais câmaras de manobra, dependendo da sua classe de tensão. Isto implica no aumento do número de componentes do disjuntor e, conseqüentemente, custo mais elevado, necessidade de mais operação de manutenção e de peças de reposição.

Figura 3. Resistor de Pré-inserção.



Fonte: Autoria própria.

Apesar da quantidade de componentes do disjuntor com resistor de pré-inserção, o equipamento é bastante eficiente para reduzir sobretensões transitórias e as energias dissipadas por para-raios. A possibilidade de eliminar o uso de RPI, substituído por técnicas que sincronizam o fechamento do disjuntor no instante ótimo proporciona uma redução na manutenção do equipamento, aumentando a confiabilidade do equipamento e do sistema elétrico.

2.2.2 Para-raios

Normalmente a solução adotada para a limitação de sobretensões de manobra de energização e religamento de linha são o aumento do nível de isolamento da linha e/ou o uso de resistores de pré-inserção (DANTAS, 2007). No entanto, adotaram-se soluções alternativas como o uso de chaveamento controlado e para-raios de Óxido de Zinco (ZnO) localizados nos terminais das linhas de transmissão ou, quando necessário, em outros pontos ao longo da linha (VALERO, 2007).

O para-raios basicamente são formados por blocos de resistores não-lineares, em que quanto maior a tensão exercida sobre ele, menor é sua resistência, portanto, a utilização do para-raios se dá devido aos baixos níveis de proteção e à alta capacidade de absorção de energia destes equipamentos. Assim, com o intuito de obter os valores das tensões residuais, os para-raios são submetidos a ensaios em laboratório por meio da aplicação de impulsos de corrente com diferentes formas de onda, pois dependem de suas características não-lineares, assim como a configuração do sistema de potência estudado. Esse equipamento geralmente é instalado próximo aos disjuntores, sendo na chegada e na saída das linhas de transmissão, permitindo uma maior segurança à subestação.

O resistor de pré-inserção mencionado anteriormente pode ser eliminado do sistema caso sejam instalados para-raios ao longo da linha de transmissão, e ainda por razões diversas, o uso do chaveamento controlado surge como uma alternativa, por ser capaz de reduzir as sobretensões transitórias e a energia dissipada pelos para-raios a níveis mais adequados (DANTAS, 2007).

As energias absorvidas dependem de suas características não-lineares e da configuração do sistema elétrico em que está inserido. Quando ocorre sobretensões de manobra ou atmosféricas os para-raios instalados na subestação conduzem ao mesmo tempo, reduzindo seu valor de resistência e absorvendo toda a energia produzida pelo surto.

Figura 4 Para-raios 500 kV



Fonte: Manual de para-raios da ABB.

2.3 Chaveamento Controlado

As sobretensões de manobra em linhas de transmissão são provocadas pelo efeito da propagação e reflexão de ondas. A amplitude dessas sobretensões é diretamente proporcional à tensão entre os contatos do disjuntor no instante do fechamento. Esse fato torna o chaveamento controlado teoricamente o método ideal para diminuição desse tipo de sobretensões, já que seu objetivo é justamente controlar o momento em que os contatos serão fechados, buscando sempre o menor valor possível de tensão entre eles no instante de fechamento ou o instante em que ocorre a menor influência no acoplamento magnético entre as fases, que é chamado de instante ótimo.

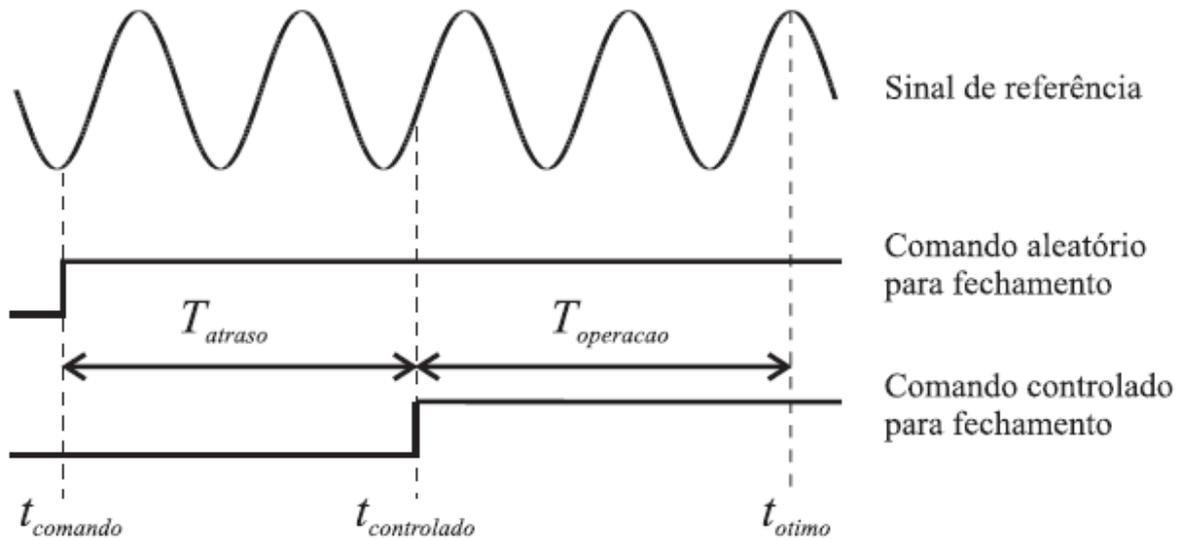
Portanto, o princípio do chaveamento controlado consiste em atrasar o comando para fechamento do disjuntor em um intervalo de tempo tal que, a tensão entre seus contatos seja zero ou próxima a zero. Essa sincronização é feita através de um controlador acoplado ao disjuntor, que toma como sinal de referência exatamente valores de tensão.

Os instantes ótimos são sempre relacionados aos valores mínimos das tensões entre os contatos do disjuntor, porém a forma de onda desta tensão varia de acordo com a natureza da manobra (energização ou religamento) e com as condições da linha de transmissão.

Em uma manobra típica de energização ou religamento de linha, os contatos do disjuntor são acionados para realizar o fechamento em um instante aleatório em relação ao sinal de tensão sobre o disjuntor. A operação não é instantânea, pois há o tempo de operação do disjuntor, $t_{operação}$. Além disso, dependendo da tensão aplicada entre os contatos do disjuntor, a passagem de corrente elétrica pode ser iniciada antes do acoplamento físico dos contatos devido à ocorrência de um arco elétrico, que surge em função da ruptura dielétrica do meio isolante. O

intervalo de tempo entre o início do arco e o acoplamento efetivo dos contatos é conhecido como tempo de pré-arco.

Figura 5. Tempos em um chaveamento controlado.



Fonte: DANTAS (2007).

Em uma manobra controlada, para que se tenha o melhor instante para efetuar a manobra, deve-se atrasar o instante de comando considerando o tempo de fechamento do disjuntor, $t_{operação}$. O tempo de atraso considerado em um chaveamento controlado leva em consideração o tempo de processamento dos sinais para cálculo do instante ótimo, tempo de comando do *trip* do disjuntor e o tempo de fechamento do contato. Na Figura 5, é mostrado um esquema simplificado que mostra como a manobra controlada é efetuada. Neste esquema, o tempo de pré-arco foi desconsiderado.

O instante ótimo para enviar o comando para o disjuntor, de acordo com a figura 5 é:

$$t_{otimo} = t_{comando} + T_{atraso} + T_{operacao} \quad (1)$$

Ao observar a Figura 5, verifica-se que quando a manobra realizada não é controlada, o fechamento dos contatos do disjuntor ocorre em um instante aleatório, favorecendo o surgimento das sobretensões. Enquanto que na manobra controlada, o fechamento do disjuntor ocorre no instante mais adequado em relação ao sinal de referência. Para o caso apresentado na figura 5, estes instantes correspondem aos instantes de passagem pelo zero do sinal. Nesse instante de fechamento o polo sofre menos esforço dielétrico, facilitando o processo de interrupção de corrente elétrica.

As estratégias adotadas para realizar o chaveamento irão depender do tipo de manobra, ou seja, se é uma energização ou um religamento de linha, além das condições da linha, isto é,

se há compensação reativa ou não e da forma de acionamento dos contatos do disjuntor. Na seção a seguir serão apresentadas as estratégias de chaveamento para cada tipo de manobra.

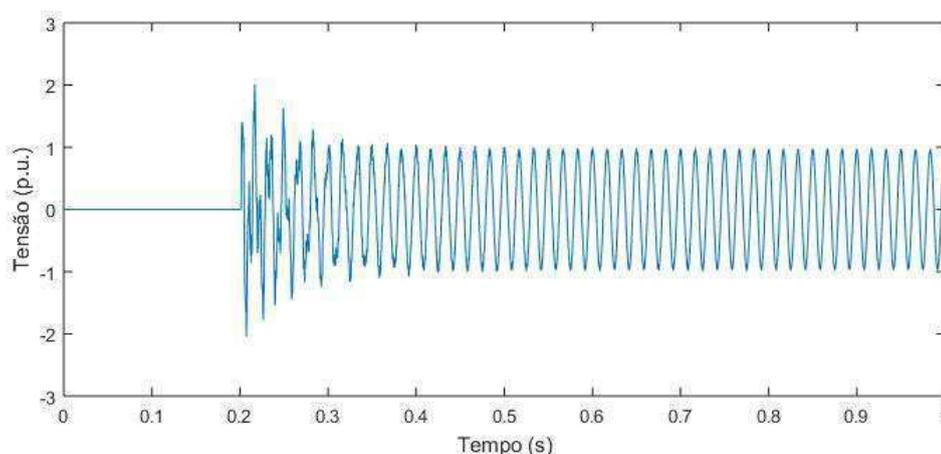
2.3.1 Energização de Linhas de Transmissão

As energizações e desligamentos de linhas de transmissão são manobras programadas que podem ocorrer rotineiramente em sistemas de potência. No entanto, o tempo entre um desligamento e uma energização é suficiente para que possíveis cargas residuais presentes na linha sejam descarregadas.

A condição em que não há a presença de carga residual na linha de transmissão no instante de fechamento do disjuntor é certamente a mais simples para a realização do chaveamento controlado. Neste caso, o instante ótimo ocorre na passagem por zero da tensão do lado da fonte. Assim, para cada fase, é necessário o monitoramento deste sinal de tensão o qual será o sinal de referência para o controle do instante ótimo para o chaveamento. Essa análise é realizada para que em cada fase ocorra a manobra no instante que irá provocar uma menor sobretensão.

Na Figura 6 é apresentado uma forma de onda de tensão, no qual foi obtido a partir de simulações no ATP, para uma manobra de energização em uma fase. Na imagem abaixo pode-se observar que o chaveamento foi realizado em 0,2 segundos, até então a tensão na linha de transmissão era zero, nesse instante ocorreu um período transitório com sobretensões que chegaram a 2,0 pu. Após um período transitório de 200 milissegundos o sinal começa a entrar em regime permanente. Caso o ponto de medição da tensão seja o terminal receptor da linha de transmissão, o tempo para que a tensão se estabeleça será acrescido de um período. Esse período é possível observar com a medição no terminal gerador e receptor da linha de transmissão.

Figura 6. Forma de onda de tensão em uma manobra de energização.



Fonte: Autoria própria.

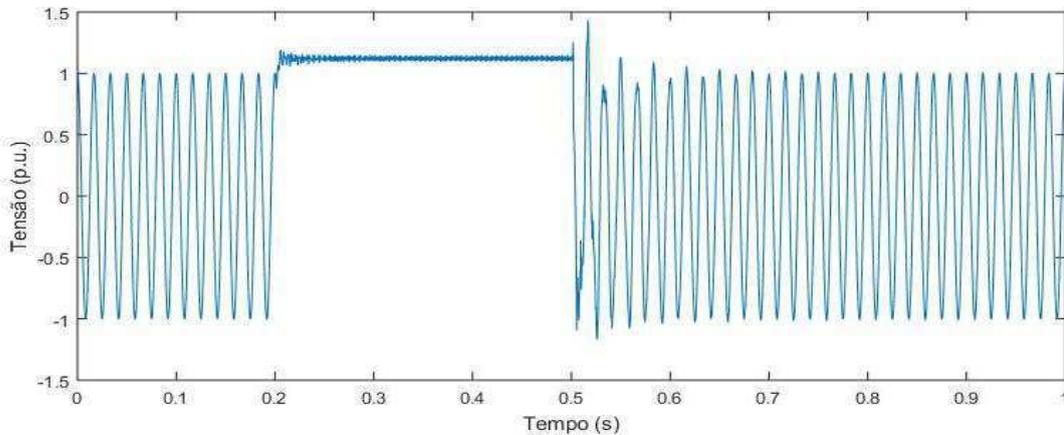
2.3.2 Religamento de Linhas de Transmissão

A manobra de religamento normalmente ocorre quando ainda há carga residual presente na linha. A forma de tensão desta carga pode ou não assumir um caráter oscilatório conforme o grau de compensação da linha de transmissão.

Em manobras de religamento, o objetivo é restabelecer o fornecimento de energia o mais rápido possível, porém há um tempo de retardo entre a abertura e o religamento do disjuntor, chamado de tempo morto e que normalmente varia entre 500 ms e 15 s, a depender da situação (FERNANDES et al, 2005).

Em linhas de transmissão sem compensação reativa, a carga residual permanece praticamente constante, em torno de $\pm 1,0$ pu, devido ao efeito capacitivo da linha. Logo, esse efeito da carga residual provoca um deslocamento da tensão entre os contatos do disjuntor, inviabilizando a escolha do instante ótimo de forma igual a manobra de religamento realizada anteriormente.

Figura 7. Forma de onda de tensão em um religamento de LT.



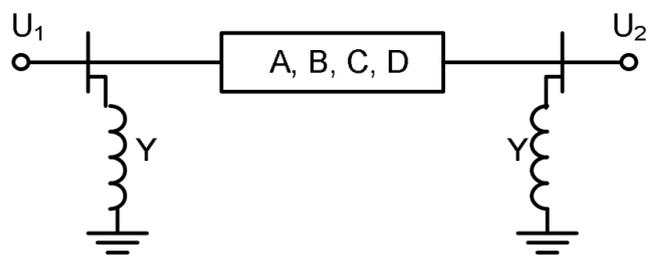
Fonte: Autoria própria.

Na figura 8 é possível observar uma linha com compensação por reatores em derivação, em que a carga residual passa a ter uma forma oscilatória, que é causada pela troca de energia entre a capacitância da linha e a indutância do reator, cuja frequência de oscilação depende do grau de compensação. Esta oscilação em geral tem uma frequência menor que a frequência nominal do sistema, tipicamente com valores entre 30 e 55 Hz, e depende do grau de compensação da linha (FROEHLICH *et al.*, 1997a). Essa frequência é dada por:

$$f_1 = f_{60} \sqrt{k} \quad (2)$$

Em que k é o grau de compensação da linha e f_{60} a frequência nominal do sistema.

Figura 8. Linha com compensação em derivação.



Fonte: Chagas (2015).

2.4 Acoplamento Eletromagnético

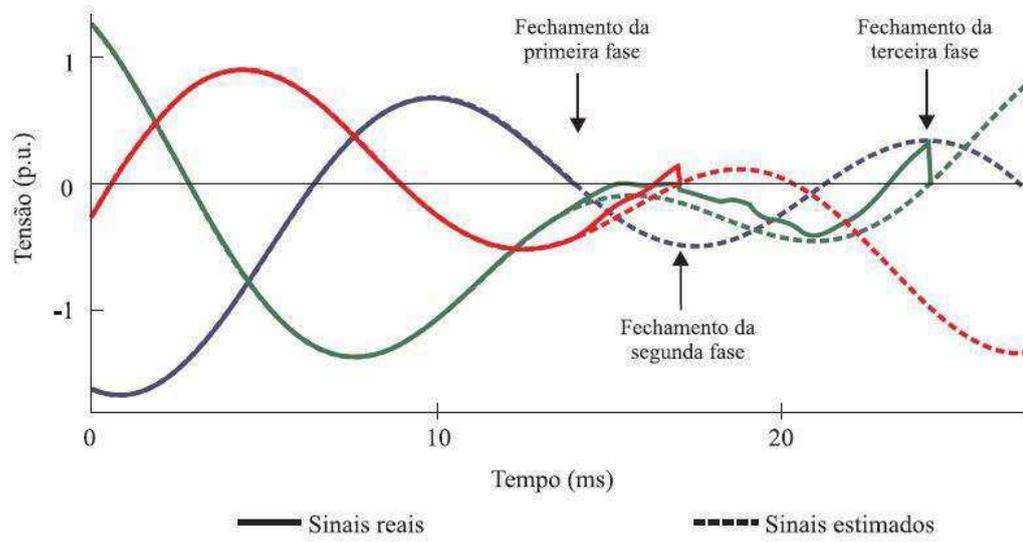
O acoplamento eletromagnético entre as fases das linhas de transmissão pode ocasionar desvios significativos nos sinais de tensão utilizados para determinação dos instantes apropriados para o chaveamento, resultando em perda de eficiência na redução de sobretensões por meio do chaveamento controlado.

Na figura 9, é possível observar os desvios de tensão nos sinais de tensão entre os contatos do disjuntor após o fechamento de cada fase nos instantes indicados. Esse efeito de acoplamento magnético alterou de forma significativa os sinais das demais fases. A manobra nas fases foi realizada de forma consecutiva, sendo possível observar que o efeito do acoplamento magnético na fase 3 foi maior comparadas às demais fases, causando uma alteração na forma de onda, conseqüentemente, alterando o instante de passagem por zero.

Com o intuito de reduzir os desvios nos sinais de referência, causados pelo efeito do acoplamento eletromagnético entre as fases, os instantes apropriados para o chaveamento ocorrem quando a tensão entre os contatos do disjuntor é zero e o intervalo entre o instante de fechamento do primeiro e do último polo é o menor possível (DANTAS 2012). Estes instantes são indicados na Figura 9 por setas pretas.

O trabalho propõe realizar simulações em disjuntores com manobra tripolar com intuito de realizar comparações dessas manobras, com as que foram utilizados nas referências em que ocorre o chaveamento de forma simultânea nas três fases.

Figura 9. Forma de onda de tensão no disjuntor devido ao acoplamento magnético.



Fonte: DANTAS (2012).

3. Implementação do Método

Para a implementação do método foi utilizado o ATP para simular e avaliar os métodos de chaveamento controlado aplicado para minimizar as amplitudes das sobretensões, ocasionadas por manobras em linhas de transmissão. Outro software utilizado foi o MALTAB para filtrar sinais indesejados, calcular as componentes de frequência e os instantes ótimos para manobras de energização e religamentos de linhas de transmissão.

3.1 Análise da carga residual

Após obtidos os sinais amostrados, as tensões do lado da linha de transmissão v_a , v_b e v_c são decompostas em componentes modais v_0 , v_1 e v_2 com o objetivo de determinar as componentes de frequência existentes nesse sinal. Para realizar essa transformação, utiliza-se a matriz de Karrenbauer como segue:

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & -2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_0 \\ v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Consequentemente, as tensões no domínio modal podem ser obtidas a partir das tensões no domínio de fases, a partir de:

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

A partir das equações 3 e 4 é possível derivar as relações que caracterizam a carga residual para casos de abertura trifásica e religamentos. Quando há uma abertura trifásica sem ocorrência de defeitos, a carga residual oscila com duas componentes de frequência. Uma das componentes de frequência é comum às três fases e é dada por v_0 . A segunda componente de frequência depende da fase que está sendo avaliada e as expressões correspondentes às fases A, B e C são dadas pelas equações 5, 6 e 7, respectivamente.

$$v_a = v_0 + v_1 + v_2 \quad (5)$$

$$v_b = v_0 - 2v_1 + v_2 \quad (6)$$

$$v_c = v_0 + v_1 - 2v_2 \quad (7)$$

A partir da equação 4, encontramos as componentes de frequência contidas na carga residual. A segunda componente para fase A, é dada por $v_1 + v_2$:

$$v_0 = (v_a + v_b + v_c) \quad (8)$$

$$v_1 = \frac{1}{3}(v_a - v_b) \quad (9)$$

$$v_2 = \frac{1}{3}(v_a - v_c) \quad (10)$$

$$(v_1 + v_2) = \frac{1}{3}(2v_a - v_b - v_c) \quad (11)$$

As componentes para as fases B e C, são encontradas a partir das equações 6 e 7, com isso encontra-se a segunda componente visto que a outra é dada por v_0 .

$$(-2v_1 + v_2) = \frac{1}{3}(-v_a + 2v_b - v_c) \quad (12)$$

$$(v_1 - 2v_2) = \frac{1}{3}(-v_a - v_b - 2v_c) \quad (13)$$

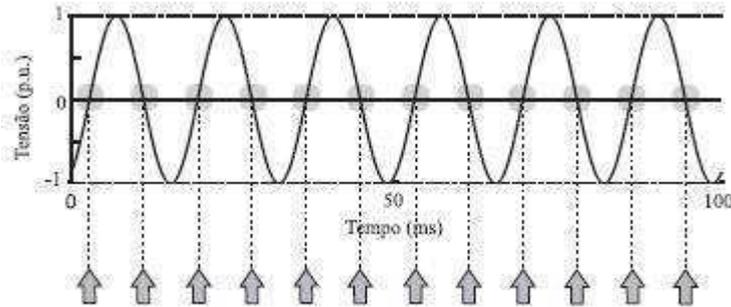
O software MATLAB é responsável por calcular as componentes, com esses dados podemos estimar os parâmetros de amplitude e frequência por meio da detecção de passagem por zero desses sinais. A amplitude do sinal é determinada com o auxílio de três amostras em que a amostra do meio deve ter uma amplitude maior que a amostra anterior e a próxima. A frequência é determinada pelo inverso do período, ou seja, o intervalo de tempo em que ocorre duas passagens por zero.

3.2 Estratégia para manobra de energização

Para esta manobra, a estratégia do chaveamento controlado é simples, de modo que o melhor instante para realizar a energização corresponde ao instante de passagem por zero da tensão entre os contatos do disjuntor. A determinação dos melhores instantes se baseia no sinal de tensão do lado da fonte, que corresponde à tensão entre os contatos do disjuntor, já que não há carga residual na linha. Na Figura 10, é apresentado um sinal de tensão típico sobre o

disjuntor em uma das fases da linha. Conforme indicado pelas setas, os possíveis melhores instantes são aqueles em que o sinal de tensão é zero.

Figura 10. Tensão nos contatos do disjuntor.

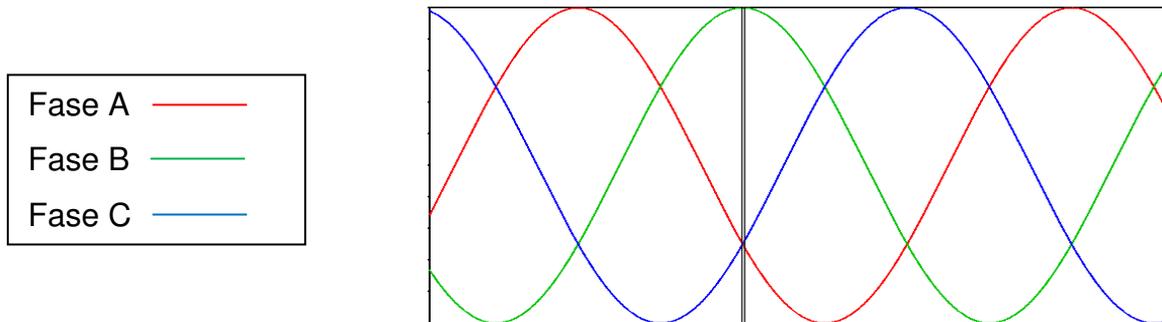


Fonte: DANTAS (2007).

Diante dos possíveis problemas que causam sobretensões o acoplamento magnético é um dos problemas que afetam o rendimento da técnica de chaveamento controlado, com o intuito de reduzir o acoplamento devido ao chaveamento realizado em instantes distintos das fases, foi realizado um estudo para obter um instante ideal para realizar a manobra simultaneamente nas três fases.

A fim de encontrar o melhor instante para realizar a manobra tripolar foram realizadas simulações em um período de 16,6 milissegundos com um $\Delta t = 0,5 \times 10^{-3} s$, para encontrar o instante ótimo. O banco de dados permitiu identificar o instante em que se tinha o menor valor de sobretensão nas fases e as características do sinal, com isso foi possível identificar o instante ótimo de chaveamento simultâneo das fases. No momento em que a tensão de duas fases se encontra com valor de 0,5 pu e a outra fase com amplitude máxima de 1 pu, deve ser realizado o chaveamento nas três fases, de forma simultânea. Apesar de uma fase está sendo chaveada em um valor máximo, nas demais o valor de sobretensão terá um valor inferior.

Figura 11. Forma de onda da tensão no disjuntor.



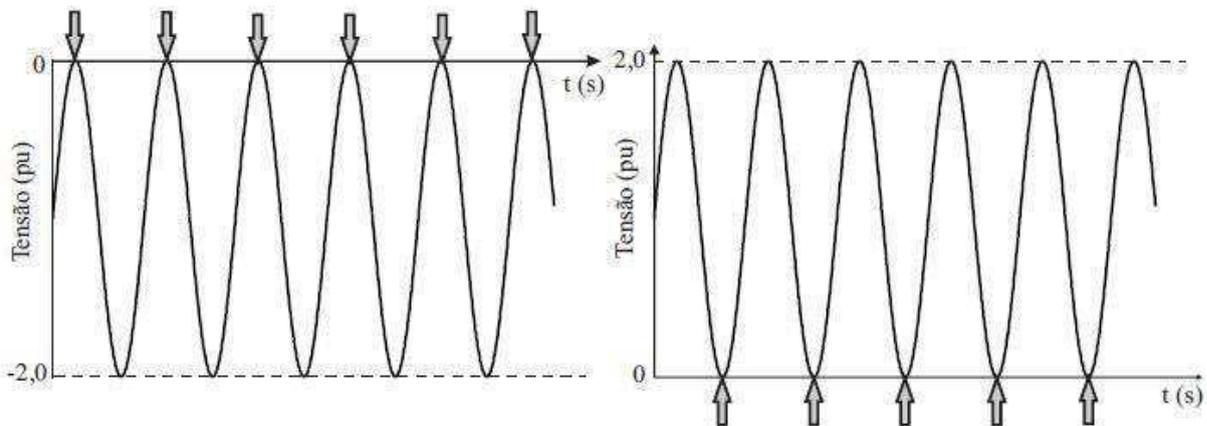
3.4 Estratégia para manobra de religamento

Quando um disjuntor opera na função de abrir uma linha em vazio, a corrente capacitiva da linha é interrompida ao passar pelo zero e quando isto ocorre a tensão na linha está passando pelo seu valor máximo, conseqüentemente deixando uma carga residual na linha, que não é igual nas três fases.

A carga residual na linha é sustentada por um certo período de tempo e se a linha é religada antes da carga residual ter sido drenada e os polos do disjuntor fecharem quando a tensão do sistema estiver com polaridade oposta à da linha, a sobretensão transitória também será elevada.

Na Figura 12, são mostrados sinais típicos de tensão entre os contatos do disjuntor quando a linha não apresenta compensação reativa, considerando os dois casos possíveis: polaridade positiva e negativa da carga residual. Os possíveis melhores instantes de fechamento estão indicados pelas setas, e correspondem aos instantes de passagem por zero, isto é, os pontos em que a tensão é mínima.

Figura 12. Tensão nos contatos do disjuntor em linha sem compensação reativa.



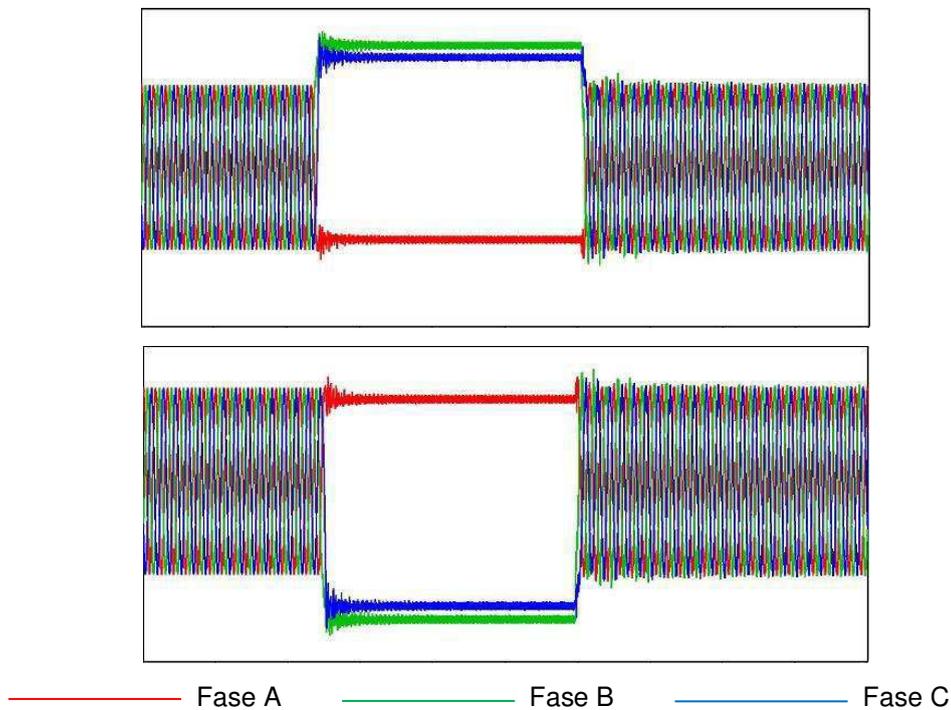
Fonte: DANTAS (2007).

Na manobra de religamento de linhas de transmissão é necessário ter o mesmo cuidado que se teve na manobra de energização, em relação ao acoplamento magnético, a fim de obter uma redução desse efeito. Na figura 13 é possível observar que em determinados instantes a tensão se aproxima do zero, sendo o melhor momento para o chaveamento. Porém, para o caso em que se tem três fases e deseja realizar a manobra simultaneamente, é necessário observar a forma de onda da tensão residual.

As tensões residuais na linha de transmissão nas 3 fases podem ser positivas ou negativas, sendo duas negativas e uma positiva ou uma negativa e duas positivas. O instante ideal para realizar a manobra é identificar a fase que tem polaridade distinta das demais e encontrar o instante ótimo, sendo o momento em que a amplitude está mais próxima do zero.

Na figura abaixo podemos observar que nos dois casos a fase A determina o instante ideal de chaveamento, diminuindo o nível de sobretensão, permitindo a manobra nas fases de forma simultânea, e, conseqüentemente, reduzindo o efeito de acoplamento magnético entre as fases. A polaridade da fase não irá afetar na redução de sobretensão do sistema, sendo necessário apenas identificar a fase que distingue das demais.

Figura 13. Tensão residual na linha de transmissão.

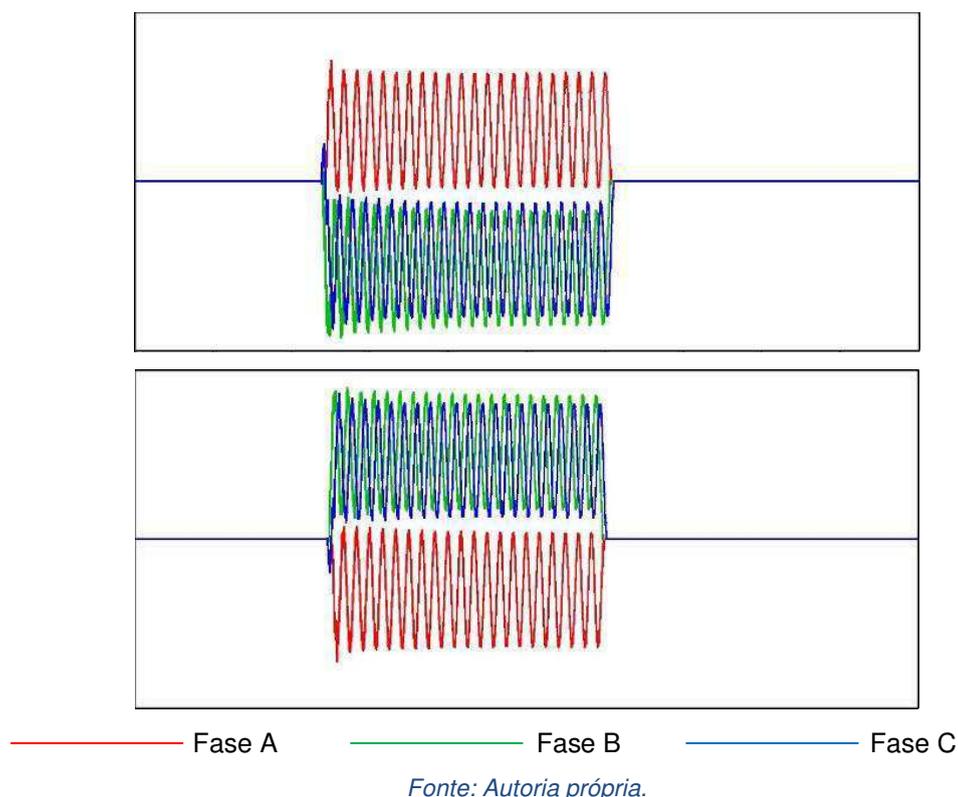


Fonte: Autoria própria.

Na figura 13, é possível observar a tensão no terminal da linha sem compensação reativa, inicialmente, o sistema está funcionando normalmente com amplitude e frequência constantes e em um determinado instante ocorre a abertura dos contatos do disjuntor, surgindo uma tensão residual praticamente constante nos terminais da linha de transmissão.

Na figura 14, é mostrado o sinal de tensão nos contatos do disjuntor, sendo o instante ideal para chaveamento quando a amplitude da tensão da fase A se aproxima do zero, reduzindo, conseqüentemente, a sobretensão ao longo da linha de transmissão.

Figura 14. Tensão nos contatos do disjuntor.



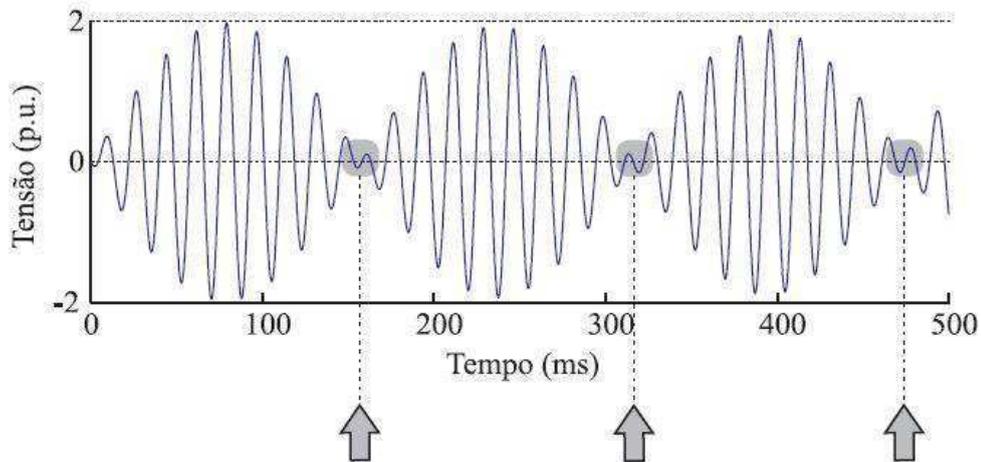
Em linhas de transmissão com compensação reativa em derivação, a depender do grau de compensação da linha, têm-se diferentes tipos de formas de onda de tensão sobre o disjuntor. Nas Figuras 15 e 16, são mostrados os sinais de tensão entre os contatos do disjuntor em uma fase para alto e baixo elevado grau de compensação, respectivamente. Apesar de existirem vários instantes de passagem por zero, o religamento da linha só deve ser efetuado em instantes presentes na região de menor batimento do sinal, conforme indicado pelas setas nas Figuras 15 e 16. Essa recomendação é feita porque nos instantes de passagem pelo zero da tensão presentes na região de maior pulsação, qualquer imprecisão pode acarretar o fechamento dos contatos do disjuntor em instantes em que a tensão está bastante elevada.

Portanto, quanto maior for o grau de compensação, mais fácil ficará a detecção dos melhores instantes de fechamento do disjuntor, pois as regiões de menor batimento do sinal estão mais bem definidas. A região de menor batimento do sinal permite minimizar o efeito de pré-arco internamente no disjuntor, caso o chaveamento seja realizado na passagem por zero.

No entanto, não é interessante compensar totalmente a capacitância da linha, limitando-se até 80%, pois o uso de reatores em derivação para a compensação reativa de linhas de transmissão pode levar a circuitos ressonantes quando há mais de um circuito na mesma faixa

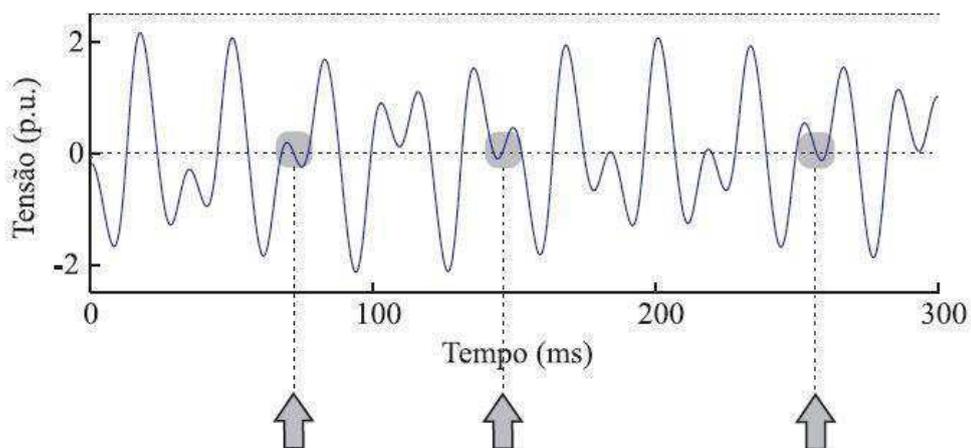
de passagem e um deles se encontra fora de operação com suas duas extremidades não aterradas (PEREIRA, 2008).

Figura 15. Tensão de referência para chaveamento em LTs com compensação de 80%.



Fonte: DANTAS (2007).

Figura 16. Tensão de referência para chaveamento em LTs com compensação de 30%.



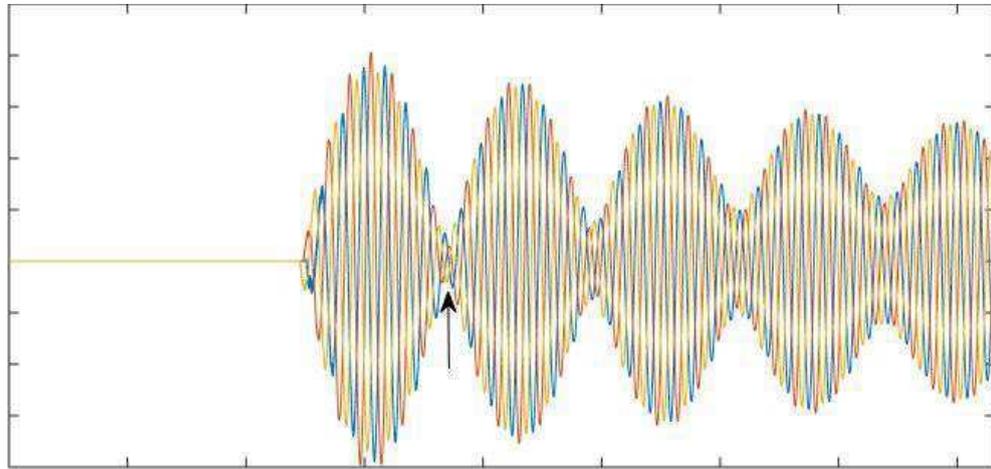
Fonte: DANTAS (2007).

O acoplamento magnético entre as fases está presente no religamento com compensação, assim como nos demais casos mostrados anteriormente, para reduzir esse efeito foi realizado um estudo para determinar o instante ideal de chaveamento simultâneo entre as fases.

Foram realizadas simulações no ATP, variando o instante de chaveamento e chegou a conclusão que o instante ideal para a realização do chaveamento é na primeira região que tem o menor batimento, proporcionando uma redução no acoplamento magnético entre as fases e

menor sobretensão ao longo da linha nesse instante. Isso ocorre devido a amplitude das fases possuírem valores próximos a zero na primeira região de batimento.

Figura 17. Tensão nos terminais do disjuntor.



Fonte :Autoria própria.

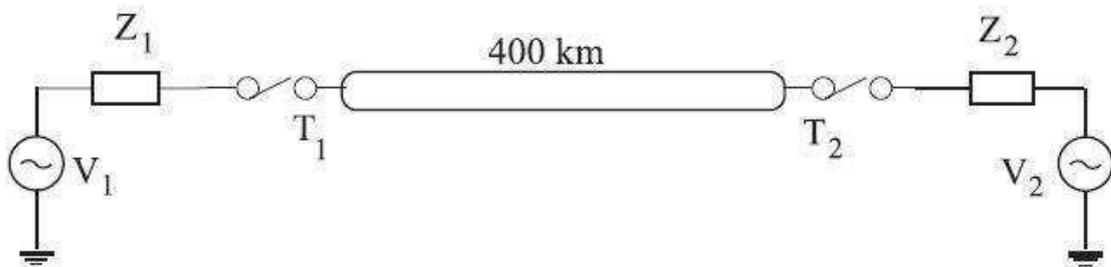
A figura 17 mostra a tensão nos contatos do disjuntor e o instante ideal encontrado nas simulações para realizar o fechamento dos contatos do equipamento. As amplitudes não chegam a 0,3 pu de pico, permitindo a redução de sobretensão ao longo da linha e o efeito de acoplamento magnético. No caso em que a compensação é de 30% o batimento não é de fácil visualização como na figura 17, mas a técnica para encontrar o instante ótimo realiza cálculos de valores de amplitude das tensões e verifica o instante em que as três fases têm a menor amplitude, sendo inferior a 0,2 pu.

4. Avaliação do método

A aplicação em disjuntores com manobra tripolar é avaliada por meio de simulações computacionais no ATP, de energizações, religamentos com compensação de 80% e 30%, religamentos sem compensação, considerando diferentes tempos no momento de chaveamento. Para a avaliação do método são realizadas comparações entre as técnicas, a fim de dizer se a técnica proposta para redução de acoplamento magnético teve resultado satisfatório, quando comparado os níveis de sobretensão.

Um sistema elétrico de potência simplificado foi utilizado para realizar as simulações computacionais no ATP. Os dados foram obtidos de um sistema elétrico de potência de 500 kV da Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF). Nesse sistema realizamos o desenvolvimento e avaliação das técnicas propostas no trabalho.

Figura 18 Esquema do sistema elétrico modelado no ATP



Fonte: DANTAS (2007)

O sistema é composto por duas fontes geradoras com suas respectivas impedâncias, uma linha de transmissão com 400 km com valores próprios de impedâncias e dois disjuntores que ficam no início e fim da linha, não foram utilizados para-raios nas extremidades do sistema. Sendo os disjuntores os responsáveis por permitirem a escolha do instante ótimo e fornecer valores de referência de tensão em seus terminais. Os valores de cada componente do sistema elétrico estão apresentados nas tabelas abaixo.

Tabela 2. Módulo e fase das fontes de tensão ($V_{base}=550kV$).

Fonte	Módulo (pu)	Fase (°)
V_1	1,00	0
V_2	0,99	-10

Fonte: Dantas(2007).

Tabela 3 Impedância das fontes

Fonte	Sequência zero		Sequência positiva	
	$R_0(\Omega)$	$X_0(\Omega)$	$R_1(\Omega)$	$X_1(\Omega)$
Fonte 1	1,1268	20,838	0,9681	28,513
Fonte 2	1,1268	20,838	0,9681	28,513

Fonte: Dantas(2007).

Tabela 4 Dados de sequência da linha de transmissão

Sequência	$R(\Omega/km)$	$X(\Omega/km)$	$\omega C (\mu\text{F}/km)$
Zero	0,3996	0,9921	3,0839
Positiva	0,0333	0,3170	5,2033

Fonte: Dantas(2007).

Tabela 5 Dados dos reatores

Reatores	$R (\Omega)$	$X(\Omega)$
80%	2	600
30%	4	1600

Fonte: Dantas(2007).

Os dados apresentados acima foram utilizados para implementar o modelo do sistema elétrico utilizando o software ATPDraw, que consiste em um pré-processador gráfico que auxilia na criação dos arquivos de entrada do ATP. O sistema elétrico modelado no ATPDraw está ilustrado na Figura 18. A depender da simulação realizada, os disjuntores foram substituídos por chaves aleatórias com tempo de fechamento e abertura determinados pelos instantes ótimos calculados pelo algoritmo feito no MATLAB.

A avaliação e validação das técnicas de chaveamento controlado para reduzir as sobretensões ao longo da linha, são verificadas por meio de simulações realizadas no ATP. Serão comparados três sinais de tensão para verificar a eficiência das técnicas, as formas de ondas são: manobra sem chaveamento controlado, chaveamento com manobras individuais e chaveamento com manobras simultâneas. Os casos que serão analisados são de energização e religamento.

4.1 Energização da Linha de Transmissão

Para realizar a avaliação da técnica de chaveamento simultâneo nas fases, o procedimento inicial é energizar os contatos do disjuntor T_1 da linha de transmissão com o disjuntor do outro lado da linha em aberto e verificar os sinais de tensão no terminal T_2 .

Nas figuras 19,20 e 21 pode-se verificar os sinais de tensão no terminal T_2 para a manobra de energização, sem e com os dois tipos de chaveamentos controlado. Para a manobra sem o chaveamento controlado, em que foi realizado o chaveamento em um instante aleatório o pico da sobretensão pode chegar a 2,45 pu. No caso em que o chaveamento ocorre no instante ideal de cada fase, o nível de sobretensão chega a 1,7 pu. O método de chaveamento simultâneo não se mostrou muito eficiente para esse tipo de manobra, surgindo níveis de sobretensão de até 2,1 pu.

Figura 19. Energização sem chaveamento controlado.

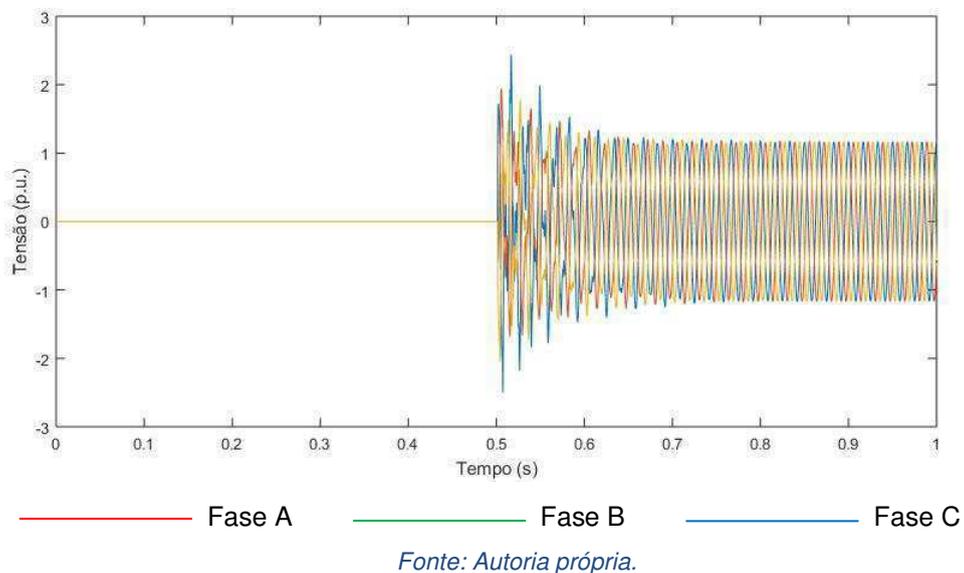


Figura 20. Energização com chaveamento independente.

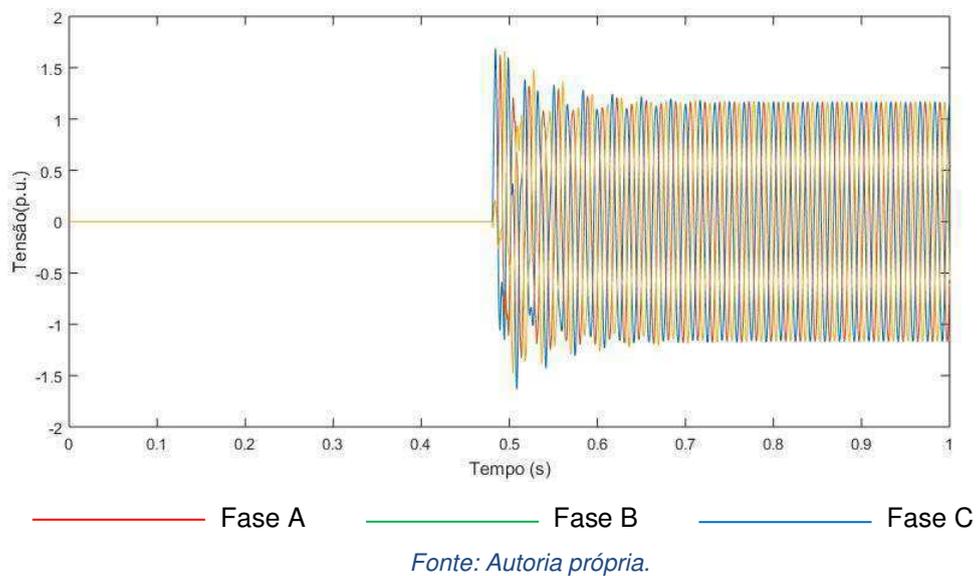
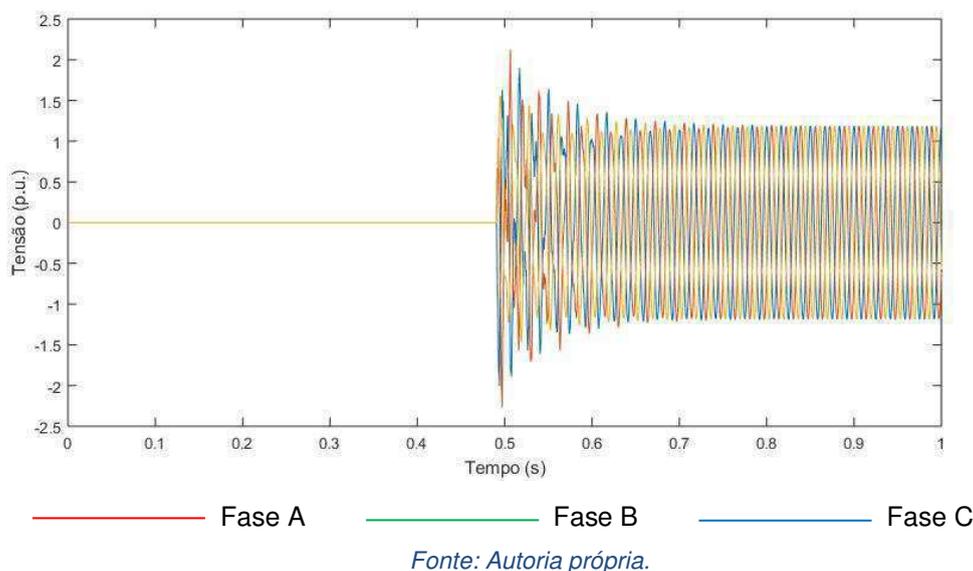


Figura 21. Energização com chaveamento simultâneo.



4.2 Religamento de Linhas de Transmissão sem Compensação

A manobra de religamento consiste em ter um sistema elétrico funcionando normalmente em regime permanente, com os contatos dos disjuntores T_1 e T_2 fechados, após um período os terminais T_1 e T_2 serão abertos até que o sistema calcule o instante ótimo de fechamento de T_1 , permanecendo T_2 em aberto. Todos os sinais de tensão mostrados nas figuras abaixo foram verificados no terminal T_2 . Nas figuras abaixo as tensões no terminal T_2 apresentam carga residual na linha, devido à ausência de compensação reativa no sistema.

Até um certo período o sistema se manteve em 1pu. até que os terminais foram abertos e posteriormente energizados. Na figura 22 pode-se observar que o religamento sem chaveamento controlado proporcionou sobretensões de até 4 pu. No segundo caso em que ocorreu o chaveamento nas fases em seus respectivos instantes ótimos, o nível de sobretensão chegou até 1,6 pu. Por fim, a técnica que propõe realizar a manobra nas três fases simultaneamente, obteve sobretensões inferiores a 1,7 pu.

A técnica de chaveamento simultâneo obteve um valor satisfatório comparado a manobra de energização, visto que limitou a sobretensão a valores similares a outra técnica utilizada.

Figura 22. Religamento sem chaveamento controlado.

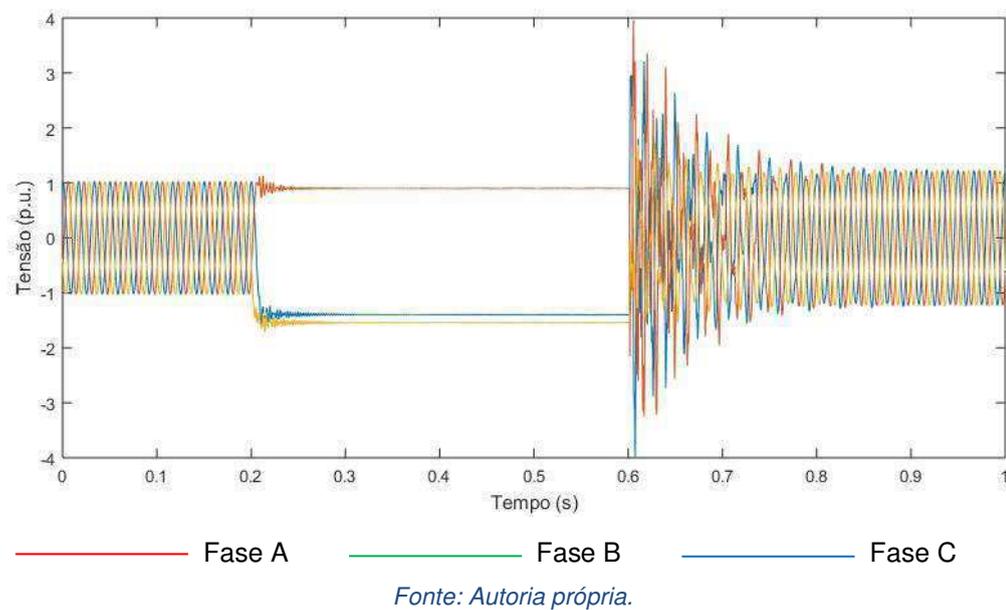


Figura 23. Religamento com chaveamento independente.

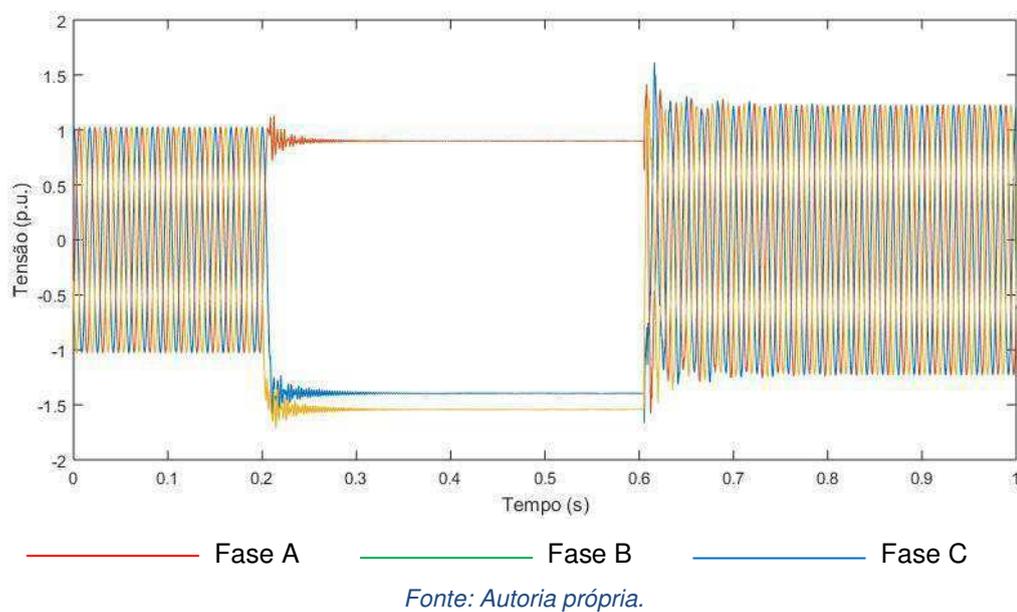
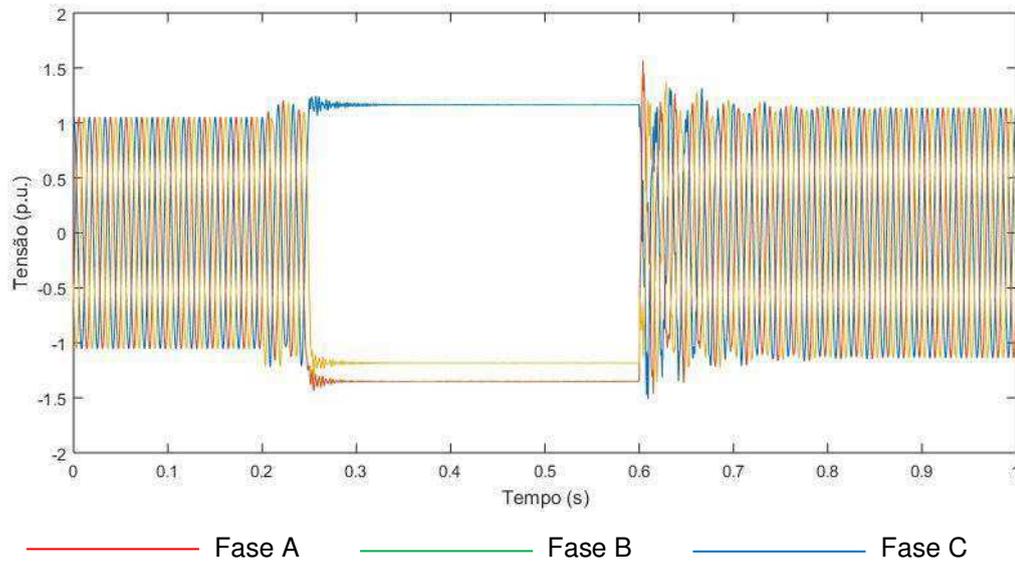


Figura 24. Religamento com chaveamento simultâneo.



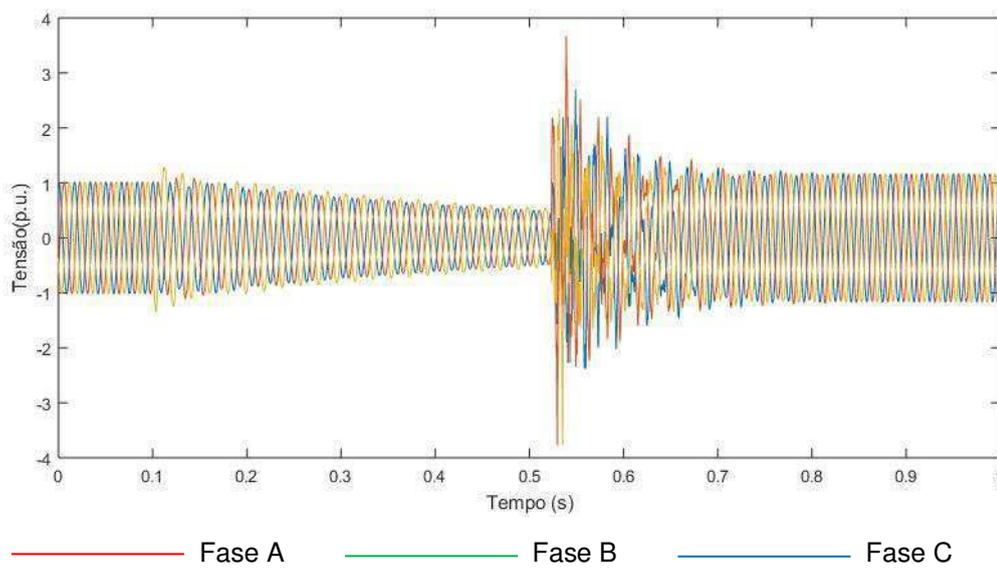
Fonte: Autoria própria.

4.3 Religamento de Linhas de Transmissão com Compensação

Nesse caso será realizado o religamento da linha com compensação de 30% e 80%, obtendo uma oscilação de 53,67 Hz e 32,68 Hz, respectivamente. A técnica como foi visto anteriormente para determinar o instante ótimo é diferente do caso em que não se tem compensação reativa. A frequência de oscilação mostrada anteriormente é bastante importante para a validação do método.

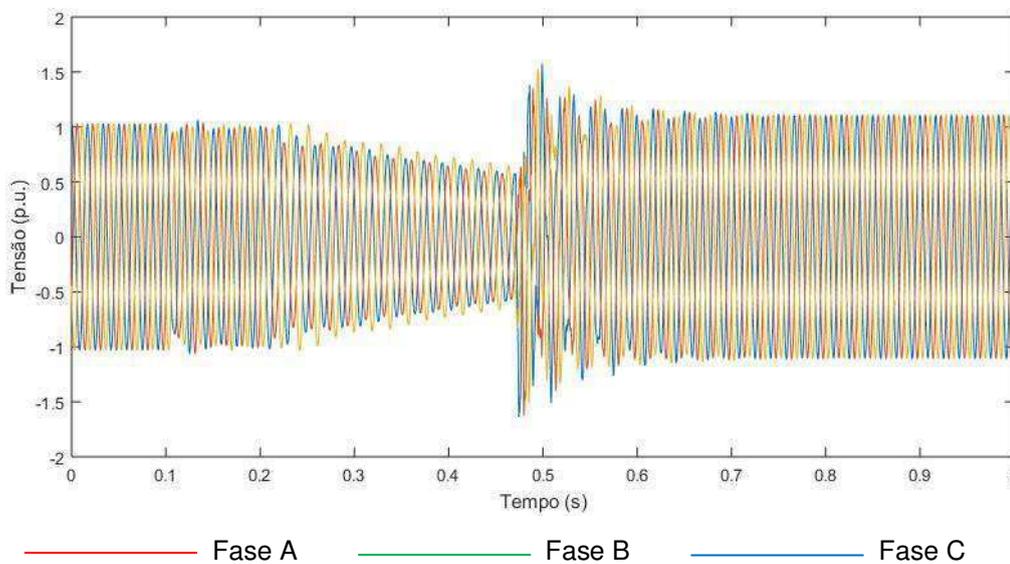
O processo de religamento não diferencia do caso sem compensação, em que os terminais T_1 e T_2 se encontram energizados, até que são abertos e depois de um determinado período, T_1 fecha e T_2 continua aberto. Os sinais de tensão mostrados nas figuras abaixo foram coletados no terminal T_2 .

Figura 25. Religamento com compensação de 80% e sem chaveamento controlado.



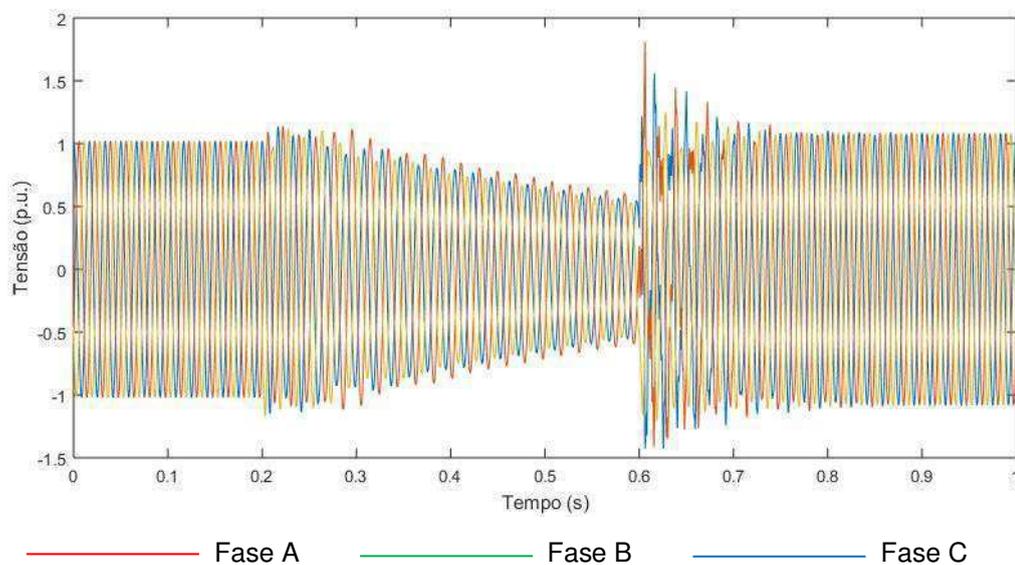
Fonte: Autoria própria.

Figura 26. Religamento com Compensação 80% e chaveamento controlado independente.



Fonte: Autoria própria.

Figura 27. Religamento com Compensação 80% e chaveamento controlado simultâneo.

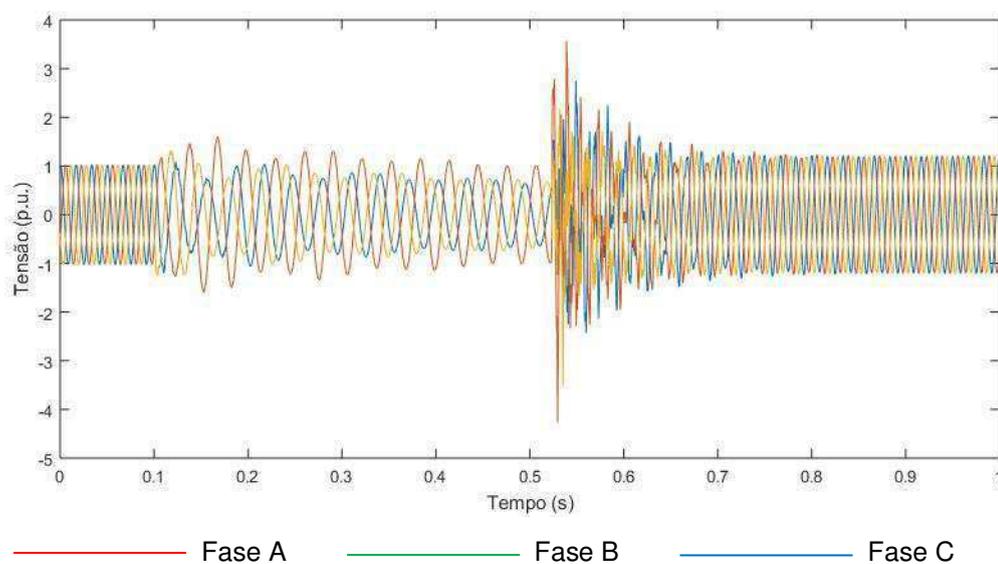


Fonte: Autoria própria.

A manobra para um sistema com compensação de 80% sem chaveamento controlado obteve valor de sobretensão superiores a 3,5 pu. No segundo caso, os valores de sobretensão foram inferiores a 1,6 pu, já que o chaveamento ocorreu em seus respectivos instantes ideais. No último caso os valores foram inferiores a 2,0 pu.

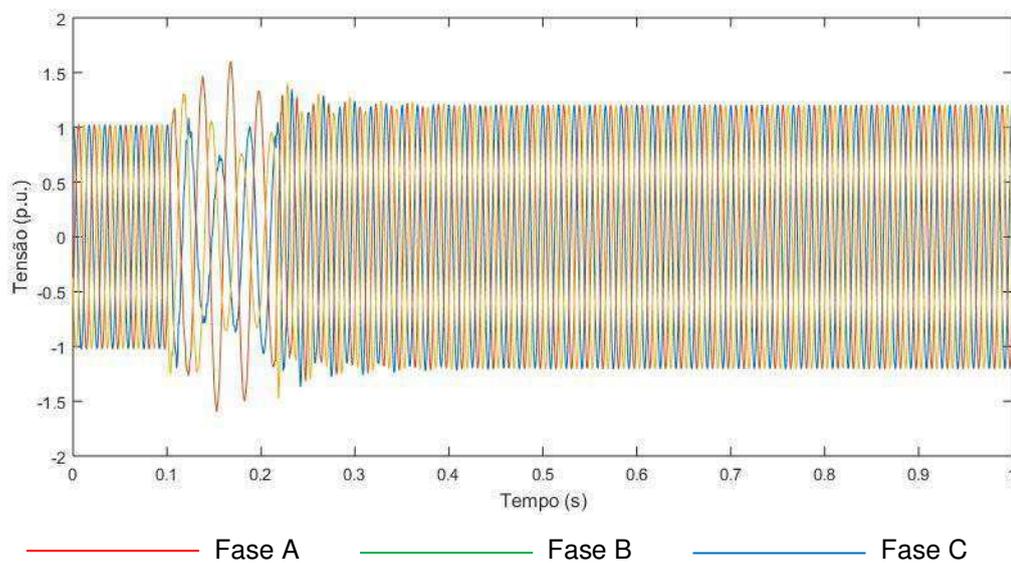
Nas figuras abaixo foi realizada a mesma análise de religamento com compensação, mas com nível de compensação de 30%.

Figura 28. Religamento com Compensação 30% sem chaveamento controlado.



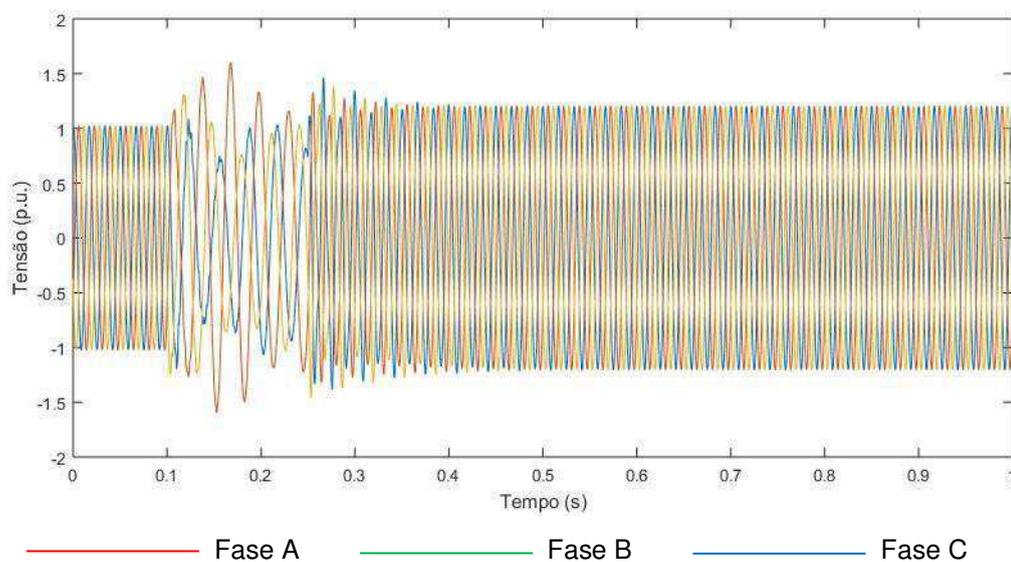
Fonte: Autoria própria.

Figura 29. Religamento com Compensação 30% e com chaveamento independente.



Fonte: Autoria própria.

Figura 30. Religamento com Compensação 30% e chaveamento simultâneo.

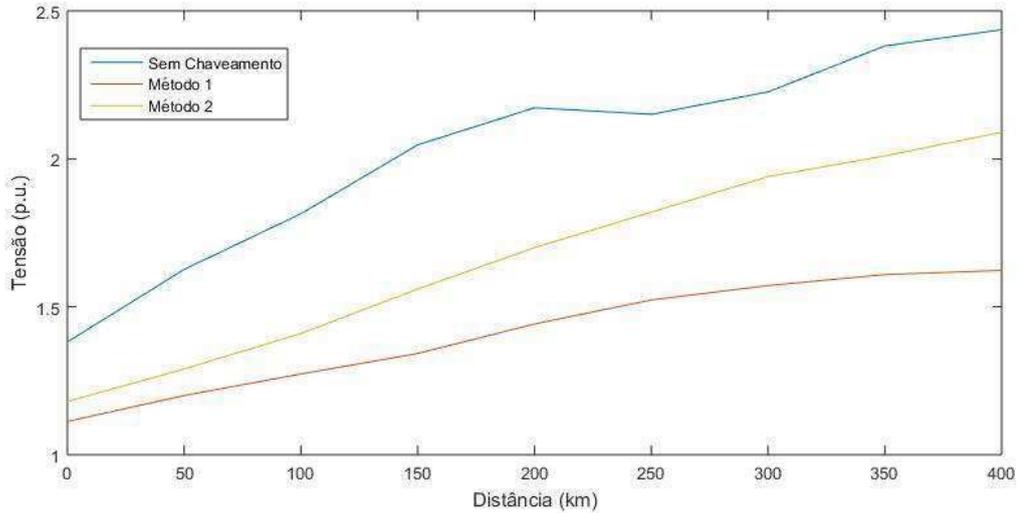


Fonte: Autoria própria.

A análise dos resultados com compensação reativa de 30% é parecida para o caso com compensação de 80%, em que a manobra sem chaveamento controlado obteve níveis de sobretensão próximo a 4,0 pu. No segundo e terceiro casos, em que as manobras foram realizadas com chaveamento controlado, ambos os níveis de sobretensão ficaram próximos de 1,5 pu. O método proposto de chaveamento simultâneo entre fases obteve o melhor resultado quando foi realizado em manobra de religamento com compensação de 30% em que os níveis de sobretensão foram praticamente iguais ao outro método utilizado.

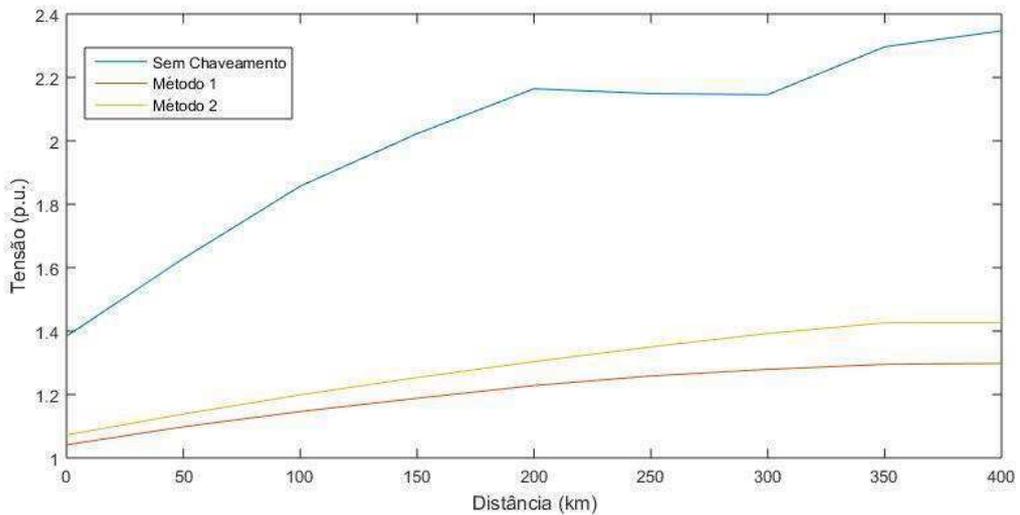
Durante as simulações realizadas no ATP, foi possível observar que os valores de sobretensão aumentavam à medida que aumentava a distância para a fonte, sendo relacionada aos fenômenos de reflexão e propagação de ondas.

Figura 31. Valores de tensão ao longo da linha em manobra de energização.



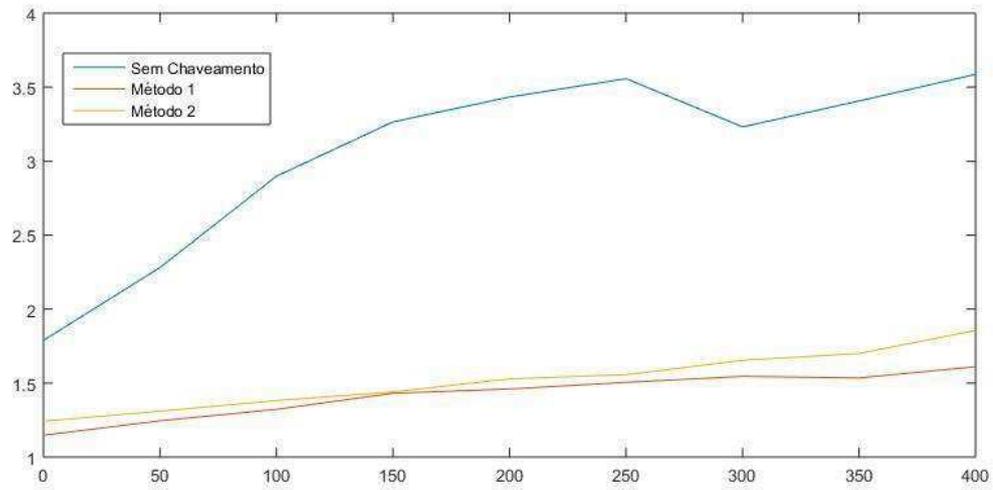
Fonte: Autoria própria.

Figura 32. Valores de tensão ao longo da linha em manobra de religamento sem compensação.



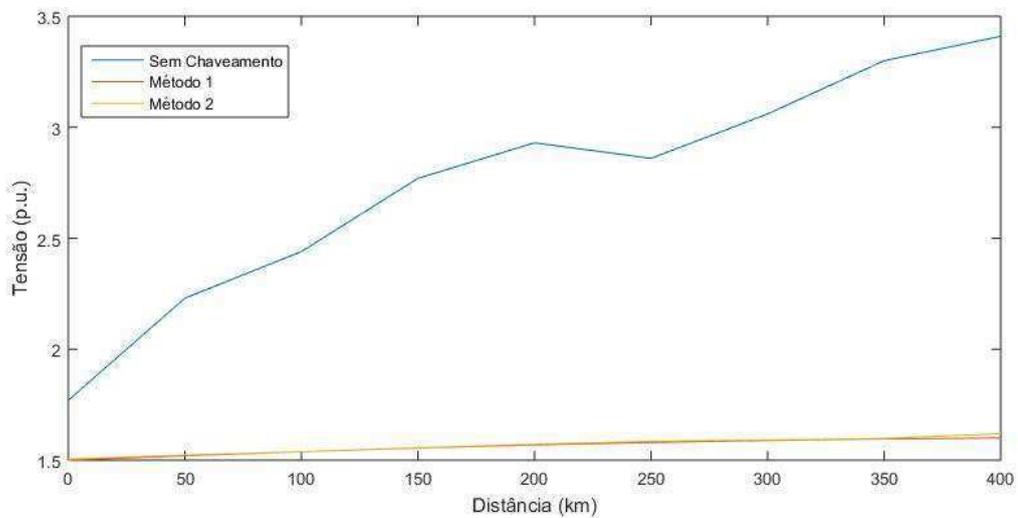
Fonte: Autoria própria.

Figura 33. Valores de tensão ao longo da linha em manobra de religamento com compensação de 80%.



Fonte: Autoria própria.

Figura 34. Valores de tensão ao longo da linha em manobra de religamento com compensação de 30%.



Fonte: Autoria própria.

Nos gráficos acima é possível observar que os fenômenos de reflexão e propagação de ondas influenciam de forma significativa nos níveis de tensão ao longo da linha, devido ao índice de reflexão. Por isso, todas as medições no esquema utilizado no ATP foram realizadas no terminal receptor da linha.

5. Conclusão

A técnica de chaveamento controlado é um método utilizado em linhas de transmissão para reduzir as sobretensões de manobra, utilizando sinais de referência de tensão ou corrente para determinar os instantes ótimos de fechamento ou abertura do disjuntor. A técnica permite reduzir o custo de fabricação e manutenção de disjuntores e aumenta a confiabilidade do sistema.

Neste trabalho, apresentou-se manobras realizadas em equipamentos com acionamento tripolar, por meio de técnicas de chaveamento controlado em que foram realizadas simulações no ATP para avaliar o desempenho das técnicas utilizadas. As manobras utilizadas nas simulações foram a de energização e religamento de linhas de transmissão, considerando o efeito da compensação reativa e acoplamento magnético entre as fases.

Os resultados apresentados anteriormente mostram três cenários quando realizada a manobra na linha de transmissão. O primeiro cenário é quando não tem chaveamento controlado. Nos outros cenários o chaveamento controlado é realizado por duas técnicas distintas. A primeira técnica procura determinar o instante ótimo de fechamento para cada polo do disjuntor de forma que o intervalo entre o fechamento do primeiro e do último polo seja o menor possível. A segunda técnica propõe determinar um instante ótimo para fechamento simultâneo de todos os polos, com o intuito de reduzir o efeito de acoplamento magnético entre as fases.

Os resultados foram obtidos por meio das simulações realizadas no ATP, possibilitando observar a importância dos métodos de chaveamento controlado para reduzir as sobretensões de manobra. Algumas manobras em que não era utilizada a técnica de chaveamento controlado, os níveis de tensão chegavam a 4 pu., podendo causar danos aos equipamentos submetidos a essa tensão.

Os métodos utilizados demonstraram reduzir de forma bastante significativa os níveis de tensão, mas o primeiro método que é realizado com manobra de chaveamento simultâneo obteve o melhor resultado quando comparado ao segundo, em todos os tipos de manobra. O método de chaveamento monopolar obteve resultados mais satisfatórios nas manobras de religamento, seja com ou sem compensação reativa. Quando a compensação foi realizada para 30%, os níveis de tensão nos dois métodos se encontraram compatíveis, reduzindo os níveis de sobretensão.

Diante desses resultados, foi possível identificar que o tempo de operação dos disjuntores afeta diretamente na eficiência da redução dos níveis de sobretensão, devido ao fechamento não ser realizado em um instante apropriado previsto pelo sistema de controle de chaveamento controlado. Outro fator relacionado ao disjuntor que afeta no rendimento dos métodos é a concordância entre os contatos, que permite um menor atraso na interrupção de circulação da corrente elétrica das fases, sendo possível extinguir a passagem da corrente nos mesmos instantes.

As possíveis análises futuras para esse tipo de manobra que podem ser realizadas, são relacionadas às faltas ocasionadas por problemas ao longo da linha são cada vez mais comum de acontecerem no sistema elétrico. Visto que, a forma de onda de tensão quando ocorre uma falta, se comporta de forma diferente dos casos analisados anteriormente, um estudo levando em consideração esses fenômenos se faz necessário para a validação dos métodos utilizados.

Referências

- ARAÚJO, A. E. A.; NEVES, W. L. A. **Cálculo de Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Energia**. Belo Horizonte, MG - Brasil: Editora UFMG, 2005.
- CHAGAS, **Apostila de Proteção de Sistemas Elétricos. 1- Distúrbios de Tensão**. p. 122. 2015.
- D'AJUZ, A.; FONSECA, C. S.; CARVALHO, F. M. S.; FILHO, J. A.; DIAS, L. E. N.; PEREIRA, M. P.; ESMERALDO, P. C. V.; VAISMAN, R.; FRONTIN, S. de O. **Transitórios Elétricos e Coordenação de Isolamentos - Aplicação em Sistemas de Potência de Alta Tensão**. Niterói, Rio de Janeiro: FURNAS, Universidade Federal Fluminense/EDUFF, 1987.
- DANTAS, K. M. C. **Chaveamento Controlado de Linhas de Transmissão**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, p. 84. 2007.
- DANTAS, K. M. C. **Chaveamento Controlado Aplicado ao Religamento Rápido de Linhas de Transmissão**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, p. 177. 2012.
- FERNANDES, A. B.; LIMA, A. C. S.; SILVA, R. M. **Religamento Automático de Linhas de Transmissão: Distinções nos Resultados em Função do Modelo Computacional Utilizado**. XVIII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Curitiba, Brasil, Outubro 2005.
- PEREIRA, M. P. **Ferromagnetismo em Sistemas Elétricos de Potência**. [S.l.]: Furnas Centrais Elétricas, 2008.
- VALERO, P. M. **Análise Comparativa de Técnicas de Controle de Sobretensões Transitórias nas Manobras de Energização e Religamento de Linhas de Transmissão**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, Brasil, Junho 2007.